Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 15, No. 2 (2025) 148–179.

Paper Type: Original Article

A Data-Driven Decision-Making Model for Supplier Selection in LARG Supply Chain Management with Emphasis on the Cultural Dimension

Seyed Jafar Hashemi[1], Javad Rezaeian[2,*], Toraj Mojibi[1]

[1] Department of Industrial Management, Firouzkouh Branch, Islamic Azad University, Firouzkouh, Iran; jafarhashemi1362h@gmail.com; torajmojibi@iaufb.ac.ir.

[2] Department of Industries, Faculty of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran ; javadjf@gmail.com.

Citation:

Received: 07 February 2025 *Revised: 21 April 2025* *Accepted: 19 May 2025*	Hashemi, S. J., Rezaeian, J., & Mojibi, T. (2025). A data-driven decision-making model for supplier selection in LARG supply chain management with emphasis on the cultural dimension. *Journal of Quality Engineering and Management, 15*(2), 148-179.

Abstract

Purpose: In today's competitive environment, selecting suitable suppliers plays a pivotal role in enhancing the efficiency and sustainability of supply chains. The LARG supply chain model, as a comprehensive approach, integrates various dimensions in supplier management. However, despite its critical influence on the success of interactions and supplier selection, the cultural dimension has received limited attention. This study aims to evaluate suppliers within the LARG framework while incorporating the cultural dimension to improve supply chain performance and achieve sustainable competitive advantage.

Methodology: This research developed a data-driven and forward-looking decision-making model for supplier evaluation and selection. First, key criteria were identified through literature review and expert consultation, and weighted using the Fuzzy Best–Worst Method (FBWM). Then, suppliers' efficiency was assessed and ranked using Fuzzy Data Envelopment Analysis (FDEA). Subsequently, the Random Forest algorithm was employed to predict future supplier performance, yielding highly accurate results.

Findings: The initial results highlighted the significance of sub-criteria such as greenhouse gas emission reduction, risk management, quality, and delivery speed in supplier evaluation. In the second phase, supplier efficiency was analyzed under various α-cuts and classified into three performance groups: high, medium, and low. The Random Forest model demonstrated high accuracy in forecasting supplier performance. Moreover, the results of the paired t-test revealed that incorporating the cultural dimension significantly improves the supplier selection process.

Originality/Value: The proposed model contributes to strategic decision-making by identifying key performance factors, enabling predictive evaluation, and employing robust analytical tools. This approach not only reduces risks and costs but also serves as a practical model for improving supply chain performance in similar industries.

Keywords: Supplier selection, Fuzzy data envelopment analysis, Machine learning, Random forest algorithm.

Corresponding Author: torajmojibi@iaufb.ac.ir

10.48313/jqem.2025.532486.1563

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۵، شماره (۲)، (۱۴۰۴)، ۱۷۹-۱۴۸

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل تصمیم‌گیری داده محور به‌منظور انتخاب تامین‌کنندگان مدیریت زنجیره‌تامین لارج با تاکید بر بعد فرهنگی

سیدجعفر هاشمی[۱]، جواد رضائیان[۲،*]، تورج مجیبی[۱]

[۱]گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران.

[۲]گروه صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.

چکیده

هدف: در فضای رقابتی کنونی، انتخاب تامین‌کنندگان مناسب نقشی کلیدی در ارتقای کارایی و پایداری زنجیره‌تامین دارد. مدل زنجیره‌تامین لارج به‌عنوان رویکردی جامع، ابعاد مختلفی را در مدیریت تامین‌کنندگان دربر می‌گیرد. بااین‌حال، بعد فرهنگی با وجود نقش موثر در موفقیت تعاملات و انتخاب تامین‌کنندگان، کمتر موردتوجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف ارزیابی تامین‌کنندگان در چارچوب مدل لارج و با درنظر گرفتن بعد فرهنگی، به دنبال ارتقای عملکرد زنجیره‌تامین و دستیابی به مزیت رقابتی پایدار است.

روش‌شناسی پژوهش: این پژوهش به توسعه یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور و آینده‌نگر برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان می‌پردازد. در ابتدا، با مرور ادبیات و نظرسنجی از خبرگان، معیارهای کلیدی شناسایی و با روش بهترین-بدترین فازی وزن‌دهی شدند. سپس، با تحلیل پوششی داده‌های فازی، کارایی تامین‌کنندگان ارزیابی و رتبه‌بندی شد. در ادامه، الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان به‌کار گرفته شد و نتایج دقیقی ارایه کرد.

یافته‌ها: نتایج مرحله اول نشان داد که زیرمعیارهایی نظیر کاهش گازهای گلخانه‌ای، مدیریت ریسک، کیفیت و سرعت تحویل از اهمیت بالایی در ارزیابی تامین‌کنندگان برخوردارند. در مرحله دوم، کارایی تامین‌کنندگان در α-کات‌های مختلف ارزیابی گردید و در سه گروه با کارایی بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی شدند. مدل جنگل تصادفی نیز توانست عملکرد تامین‌کنندگان را با دقت بالا پیش‌بینی کند. همچنین، نتایج آزمون t جفتی نشان داد که در نظر گرفتن بعد فرهنگی، به‌طور معناداری موجب بهبود فرآیند انتخاب تامین‌کنندگان می‌شود.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل ارایه‌شده با شناسایی عوامل کلیدی عملکرد، ارزیابی آینده‌نگر و بهره‌گیری از تحلیل‌های دقیق، می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در انتخاب و مدیریت تامین‌کنندگان کمک کند. این مدل نه‌تنها موجب کاهش ریسک و هزینه‌ها می‌شود، بلکه به‌عنوان الگویی کاربردی برای بهبود عملکرد زنجیره‌تامین در صنایع مشابه نیز قابل استفاده است.

کلیدواژه‌ها: انتخاب تامین‌کننده، تحلیل پوششی داده‌های فازی، یادگیری ماشین، الگوریتم جنگل تصادفی.

۱- مقدمه

در عصر پیچیده و رقابتی کنونی، سازمان‌ها برای بقا و دستیابی به مزیت رقابتی پایدار، ناگزیر به ارتقای کارایی و تاب‌آوری زنجیره‌های تامین خود هستند. زنجیره‌تامین، به‌عنوان شبکه‌ای پویا از فعالیت‌ها، سازمان‌ها، افراد و منابع، نقشی اساسی در فرآیند تولید و توزیع کالا و خدمات ایفا می‌کند

[1]، [2]. مدیریت اثربخش این زنجیره می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت، ارتقای سرعت تحویل و درنهایت افزایش رضایت مشتری و سودآوری سازمان شود. ازاین‌رو، تمرکز بر مسایل مرتبط با زنجیره‌تامین و ارایه راهکارهایی برای بهینه‌سازی آن، طی دهه‌های اخیر به یکی از اولویت‌های اساسی پژوهش‌های مدیریتی و صنعتی تبدیل شده است [3].

در این میان، انتخاب و ارزیابی تامین‌کنندگان، به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین تصمیمات در مدیریت زنجیره‌تامین، از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ چرا که عملکرد تامین‌کنندگان مستقیما بر کیفیت، زمان‌بندی، هزینه و پایداری کل زنجیره‌تامین تاثیرگذار است [4–6]. بر همین اساس، توسعه مدل‌های ارزیابی چندمعیاره جهت انتخاب بهینه تامین‌کنندگان، به یکی از محورهای اصلی در ادبیات پژوهشی این حوزه تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، مدل زنجیره‌تامین لارج (*LARG*) که ترکیبی از چهار رویکرد ناب (*Lean*)، چابک (*Agile*)، تاب‌آور (*Resilient*) و سبز (*Green*) است، به‌عنوان چارچوبی جامع و نوین برای مدیریت پیشرفته زنجیره‌تامین معرفی شده است [7]. این مدل با بهره‌گیری از نقاط قوت هر یک از این رویکردها، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا ضمن کاهش اتلاف منابع و افزایش انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات بازار، مقاومت بیشتری در برابر اختلالات از خود نشان دهند و درعین‌حال، الزامات زیست‌محیطی را نیز رعایت کنند.

از سویی دیگر، یکی از ابعاد کلیدی که در بسیاری از مدل‌های ارزیابی تامین‌کنندگان مورد غفلت قرار گرفته، بعد فرهنگی است. در فضای جهانی‌شده امروز، زنجیره‌های تامین شامل تعامل میان سازمان‌هایی با فرهنگ‌ها، ارزش‌ها و سبک‌های مدیریتی متنوع هستند. درک و مدیریت بعد فرهنگی، به‌ویژه در زنجیره‌های تامین بین‌المللی، نقش مهمی در موفقیت همکاری‌ها ایفا می‌کند [8]. فرهنگ می‌تواند بر جنبه‌هایی همچون ارتباطات، مذاکره، تصمیم‌گیری، مدیریت ریسک و استانداردهای اخلاقی در زنجیره‌تامین تاثیرگذار باشد. اختلافات فرهنگی در این زمینه‌ها می‌توانند به تعارض، سوتفاهم، کاهش هماهنگی و اختلال در عملکرد زنجیره منجر شوند [9]. به‌عنوان‌مثال، درک متفاوت از ریسک یا استانداردهای کاری در فرهنگ‌های مختلف ممکن است موجب تاخیر یا عدم تطابق با الزامات سازمان‌ها شود. ازاین‌رو، تلفیق بعد فرهنگی در فرآیند ارزیابی تامین‌کنندگان، می‌تواند دقت و اثربخشی تصمیم‌گیری را به‌طور معناداری افزایش دهد [10]، [11]. در این پژوهش، بعد فرهنگی به‌عنوان مجموعه‌ای از ویژگی‌ها و رفتارهای سازمانی و فردی تعریف شده است که بر تعاملات، همکاری‌ها و تصمیم‌گیری‌ها در زنجیره‌تامین اثرگذار هستند. به‌طور خاص، سه مولفه کلیدی فرهنگی شامل "درک فرهنگ" (توانایی آگاهی و احترام به تفاوت‌های فرهنگی)، "ارتباطات موثر" (توانایی برقراری ارتباط شفاف و بدون سوتفاهم در محیط‌های فرهنگی مختلف) و "انعطاف‌پذیری فرهنگی" (توانایی تطبیق رفتار و فرآیندهای کاری با تفاوت‌های فرهنگی) به‌عنوان ابعاد اصلی بعد فرهنگی انتخاب و عملیاتی شده‌اند. این سه مولفه بر اساس مرور ادبیات مرتبط با مدیریت زنجیره‌تامین و فرهنگ سازمانی انتخاب شده‌اند و به‌عنوان عوامل کلیدی در بهبود هماهنگی و اثربخشی همکاری‌ها در محیط‌های چندفرهنگی شناخته می‌شوند [8]، [11]، [12]. در این راستا، برخلاف مدل‌های کلاسیک فرهنگی مانند *Hofstede*، *Trompenaars* یا *GLOBE* که بیشتر بر ابعاد ملی و گسترده فرهنگ تاکید دارند، تمرکز پژوهش بر مولفه‌های رفتاری و سازمانی قابل‌اندازه‌گیری در سطح شرکت‌ها و زنجیره‌تامین می‌باشد که کاربرد عملی‌تری در فرآیند انتخاب تامین‌کننده دارند.

با توجه به اهمیت موارد یادشده، پژوهش حاضر به ارایه یک رویکرد داده‌محور برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان در چارچوب زنجیره‌تامین لارج با تاکید ویژه بر بعد فرهنگی می‌پردازد. در گام نخست، معیارهای مرتبط با ابعاد چهارگانه مدل لارج و مولفه‌های فرهنگی، با استناد به ادبیات پژوهش و نظرات خبرگان، شناسایی و با استفاده از روش بهترین–بدترین فازی[1] وزن‌دهی شده‌اند. سپس، با بهره‌گیری از تحلیل پوششی داده‌های فازی[2]، عملکرد تامین‌کنندگان مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان کارایی آن‌ها تعیین شده است. در ادامه، الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی[3] به‌کار گرفته شده است تا با رویکردی آینده‌نگر، عملکرد آتی تامین‌کنندگان پیش‌بینی گردد. این ترکیب از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل فازی و یادگیری ماشین، امکان ارزیابی دقیق‌تر، مقاوم‌تر و پیش‌بینانه‌تری را در فرآیند انتخاب تامین‌کنندگان فراهم می‌سازد. از سویی دیگر، در این پژوهش، با هدف ارایه مدلی کاربردی و ارتقای عملکرد صنایع کشور، یک مطالعه موردی واقعی انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفته است. در این راستا، شرکت

[1] Fuzzy Best Worst Method (FBWM)
[2] Fuzzy DEA
[3] Random forest

پارس سلولز به‌عنوان یکی از شرکت‌های فعال و اثرگذار در صنعت سلولزی ایران انتخاب شده است. این شرکت با فعالیت در حوزه تامین مواد اولیه و تولید محصولات سلولزی، نقش مهمی در مدیریت زنجیره‌تامین این صنعت ایفا می‌کند.

به‌صورت کلی، این پژوهش به دنبال پاسخ به سوالاتی به شرح زیر می‌باشد:

۱. معیارهای مهم برای ارزیابی تامین کنندگان در مدیریت زنجیره‌تامین لارج با تاکید بر بعد فرهنگی کدامند؟
۲. چگونه می‌توان با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها فازی، کارایی تامین‌کنندگان را ارزیابی کرد؟
۳. چگونه می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان استفاده کرد؟

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی تامین‌کنندگان در زنجیره‌تامین انجام شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر ارزیابی تامین‌کنندگان در چارچوب زنجیره‌تامین لارج و با درنظر گرفتن بعد فرهنگی، تلاش دارد به توسعه رویکردهای ارزیابی در این حوزه بپردازد. با توجه به اینکه پارادایم لارج شامل چهار بعد ناب، چابک، تاب‌آور و سبز است، ابتدا مروری بر مطالعات پیشین صورت می‌گیرد که در آن‌ها حداقل یکی از این ابعاد در فرآیند ارزیابی تامین‌کنندگان لحاظ شده است. سپس، به بررسی مطالعاتی اختصاص دارد که با بهره‌گیری از رویکردهای داده‌محور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تلاش کرده‌اند ارزیابی تامین‌کنندگان را با دقت و آینده‌نگری بیشتری انجام دهند. در گام پایانی شکاف‌های موجود در ادبیات پژوهش شناسایی شده و جایگاه و نوآوری پژوهش حاضر در پر کردن این شکاف‌ها تبیین می‌گردد.

۲-۱- ارزیابی تامین کنندگان با درنظر گرفتن حداقل یکی از ابعاد لارج بودن (ناب بودن، تاب‌آوری، چابکی و سبز بودن)

در حوزه زنجیره‌تامین ناب، کوک و همکاران [13]، مساله انتخاب تامین‌کننده پایدار در شرایط رقابتی و تحت الزامات جدید پرداخته‌اند و چارچوبی نوین با عنوان "*S-ILK*" معرفی کرده‌اند که در آن ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پایداری با سه مولفه نوآوری، اصول ناب و مدیریت دانش ترکیب شده‌اند. برای مواجهه با عدم قطعیت‌های احتمالی، مدلی ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو به همراه روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس به‌کار گرفته شده است. برخلاف روش‌های سنتی، خروجی‌ها به‌صورت توزیع‌های احتمالی ارایه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد پایداری اقتصادی و توانمندی در مدیریت دانش از مهم‌ترین معیارها در ارزیابی تامین‌کنندگان هستند. این چارچوب می‌تواند راهنمایی کاربردی برای ارتقای عملکرد پایداری شرکت‌ها از طریق نوآوری، بهبود کیفیت داده‌ها و به‌کارگیری اصول ناب باشد.

در پژوهشی دیگر، گارسیا-بوئندیا و همکاران [14]، به بررسی نقش عملکرد راهبردی تامین‌کنندگان و شدت رقابت در پیاده‌سازی مدیریت زنجیره‌تامین ناب و تاثیر آن بر عملکرد سازمانی پرداختند. داده‌های تجربی از نمونه‌ای متشکل از ۲۷۳ شرکت اسپانیایی جمع‌آوری شده و با استفاده از مدل‌یابی معادلات ساختاری مبتنی بر واریانس تحلیل شدند. نتایج نشان داد که عملکرد راهبردی تامین‌کنندگان تاثیر مثبتی بر پیاده‌سازی مدیریت زنجیره‌تامین ناب دارد و این تاثیر در صنایع با شدت رقابت بالا تقویت می‌شود. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن است که پیاده‌سازی مدیریت زنجیره‌تامین ناب نقش واسطه‌ای در رابطه میان عملکرد تامین‌کننده راهبردی و عملکرد سازمانی ایفا می‌کند.

در پژوهشی فروزش نژاد و همکاران [15]، محققین به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده در صنعت تجهیزات پزشکی با درنظر گرفتن شاخص‌های چابک-ناب، پایداری و صنعت چهار پرداختند. ابتدا معیارها با نظر خبرگان تعیین و سپس با استفاده از نسخه توسعه‌یافته بهترین-بدترین وزن‌دهی شدند. در ادامه، رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با روش مقایسه ناحیه مرزی انجام گرفت. مطالعه موردی در یک شرکت فعال در دوران کرونا انجام شد. نتایج نشان داد چابکی و پایداری از مهم‌ترین معیارها و انعطاف‌پذیری تولید، هزینه، قابلیت اطمینان و کیفیت از مهم‌ترین زیرمعیارها هستند. این مطالعه برای نخستین بار ترکیب این سه شاخص را در انتخاب تامین‌کننده بررسی کرده است.

حفظار و همکاران [16]، به مساله انتخاب تامین‌کننده با رویکردی مبتنی بر شفافیت، پایداری و کارایی پرداخته‌اند و به‌منظور رفع چالش‌هایی نظیر نبود شفافیت، خطای انسانی، فساد و ناکارآمدی، یک سیستم مبتنی بر فناوری زنجیره بلوکی طراحی و ارایه کرده‌اند. این سیستم فرآیند انتخاب تامین‌کننده را با درنظر گرفتن معیارهای پایداری وو چابکی-نابی به‌صورت خودکار انجام می‌دهد و از سازوکاری مبتنی بر ارزیابی متقابل خریداران

و فروشندگان بهره می‌برد. همچنین، از روش مزایده معکوس چندمعیاره برای انتخاب بهترین پیشنهاد استفاده شده و با بهره‌گیری از ساختار ترکیبی درون‌زنجیره‌ای و برون‌زنجیره‌ای روی یک بلاک‌چین خصوصی پیاده‌سازی شده است تا هزینه‌های تراکنش کاهش یابد. نتایج آزمون‌های عملکرد، مقیاس‌پذیری و امنیت نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی ضمن حفظ ایمنی، قابلیت کاربرد در مقیاس وسیع را داراست. این راهکار با ارتقای شفافیت، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و زیست‌محیطی، بستری کارآمد برای انتخاب تامین‌کننده در مناقصات خصوصی و دولتی فراهم می‌آورد.

در حوزه زنجیره‌تامین تاب‌آور، اولوتاس و همکاران [17]، به مساله انتخاب تامین‌کننده با رویکردی راهبردی، به‌منظور کاهش ریسک‌های ناشی از اختلالات زنجیره‌تامین در شرایط پرابهام کنونی پرداختند. بدین منظور، یک روش جامع تصمیم‌گیری چندمعیاره با رویکرد خاکستری توسعه داده شد که ویژگی‌های تاب‌آوری تامین‌کنندگان را در ارزیابی‌ها لحاظ می‌کند. برای تعیین اوزان شاخص‌ها از روش‌های خاکستری *PSI* و بهترین–بدترین استفاده شد و برای ارزیابی و رتبه‌بندی تامین‌کنندگان تاب‌آور، روش‌های خاکستری *MCRAT* و *COBRA* به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تامین‌کننده با کد *SPIR 4* دارای بالاترین سطح تاب‌آوری است و سایر تامین‌کنندگان به ترتیب *SPIR 5*، *SPIR 1*، *SPIR 3*، *SPIR 2* و *SPIR 6* رتبه‌بندی شدند. داده‌ها بیانگر دقت و کارایی مدل پیشنهادی در شناسایی تامین‌کنندگان تاب‌آور هستند.

در پژوهشی دیگر، سان و همکاران [18]، به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده تاب‌آور به‌عنوان عاملی کلیدی برای ایجاد زنجیره‌تامین منعطف در شرایط اختلال پرداختند و چارچو بی ترکیبی بر پایه تصمیم‌گیری گروهی چندمعیاره فازی ارایه دادند. ابتدا برای مدیریت عدم قطعیت و ذهنی‌بودن نظرات خبرگان، مجموعه‌های اصطلاحات زبانی نامطمئن احتمالاتی (*PULTS*) معرفی شد. سپس به‌منظور وزن‌دهی به معیارهای تاب‌آوری با درنظر گرفتن تفاوت دیدگاه‌ها و دانش خبرگان، روش بهترین–بدترین زبانی نامطمئن احتمالاتی (*PUL-BWM*) توسعه یافت. همچنین، به دلیل محدودیت‌های روش سنتی تاپسیس در برخورد با داده‌های دارای مقادیر منفی و ناتوانی در انعکاس همبستگی اطلاعات، روش توسعه‌یافته‌ای مبتنی بر ضریب همبستگی ترکیبی زبانی نامطمئن احتمالاتی (*PULSCC*) برای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان تاب‌آور طراحی شد. درنهایت، مطالعه‌ای موردی در صنعت خودروسازی برای اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی انجام گرفت و نتایج تحلیل حساسیت و مقایسه‌ای، اثربخشی و برتری روش پیشنهادی را تایید نمودند.

بسرا و دیاز [19]، به مساله انتخاب تامین‌کننده در صنعت معدن با تمرکز بر معیارهای پایداری و تاب‌آوری پرداختند؛ موضوعی که تاکنون کمتر به‌طور خاص در این صنعت بررسی شده است. با استفاده از رویکرد پژوهش سازنده و در همکاری با ذی‌نفعان صنعتی، یک مدل ریاضی به‌منظور بهینه‌سازی انتخاب تامین‌کنندگان توسعه یافت. این مدل امکان ارزیابی جامع تامین‌کنندگان را فراهم می‌سازد و علاوه بر هزینه، عواملی همچون تاثیرات زیست‌محیطی، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و توانایی حفظ تامین در شرایط اختلال را درنظر می‌گیرد. دستاورد اصلی پژوهش، ارایه مدلی کاربردی و معتبر برای انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور در صنعت معدن است.

در حوزه زنجیره‌تامین سبز، آنواجونو و همکاران [20]، به بررسی رابطه بین انتخاب تامین‌کننده سبز و عملکرد سبز سازمان پرداخته‌اند و نقش تعدیل‌گرانه سازوکارهای حاکمیتی شامل کنترل فرآیند و کنترل نتایج را در این ارتباط تحلیل کرده‌اند. داده‌های پژوهش از بخش تولیدی چین گردآوری و با استفاده از تحلیل رگرسیون بر روی ۲۹۵ نمونه بررسی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب تامین‌کننده سبز تاثیر مثبتی بر عملکرد زیست‌محیطی شرکت دارد و این رابطه تحت تاثیر نحوه اعمال کنترل‌های فرآیندی و نتیجه‌محور تقویت می‌شود. این پژوهش با تاکید بر نقش انتخاب تامین‌کننده در بهبود عملکرد سبز و معرفی سازوکارهای کنترل به‌عنوان عوامل کلیدی، به غنای ادبیات زنجیره‌تامین پایدار و ارایه توصیه‌های کاربردی برای فعالان صنعتی کمک می‌کند.

در پژوهشی دیگر، اوگراه و همکاران [21]، به بررسی انتخاب تامین‌کننده سبز از منظر سرمایه ارتباطی سبز پرداختند و تلاش کردند تا خلا موجود در مطالعات تجربی در زمینه نقش همکاری‌های شبکه‌ای در فرآیند انتخاب تامین‌کننده سبز را پوشش دهند. مطالعه به‌صورت کیفی و از طریق مصاحبه با ۲۷ فرد کلیدی در هفت دانشگاه دولتی غنا انجام شد. نتایج نشان داد که یکی از دلایل اصلی عدم ادغام معیارهای سبز در انتخاب تامین‌کنندگان، ضعف همکاری میان ذی‌نفعان سبز است. این همکاری می‌تواند از طریق آموزش‌های سبز، کنفرانس‌ها، توسعه حرفه‌ای مستمر و تعامل با نهادهای تخصصی تقویت شود. مولفه‌هایی نظیر اعتماد و ثبات، منافع متقابل، نیت‌های آشکار و ارتباط موثر به‌عنوان عوامل کلیدی در

ایجاد شبکه‌های همکاری موثر شناسایی شدند. این پژوهش با تاکید بر اهمیت سرمایه ارتباطی سبز، بینش‌های کاربردی برای ادغام پایداری زیست‌محیطی در فرآیند تامین ارایه می‌دهد و به ارتقای عملکرد زیست‌محیطی سازمان‌ها کمک می‌کند.

در پژوهشی دیگر، وو و چانگ [22]، به بررسی عوامل حیاتی موفقیت در فرآیند انتخاب تامین‌کننده سبز پرداختند. هدف پژوهش تحلیل روابط علی و ساختار سلسله‌مراتبی میان این عوامل برای بهبود اثربخشی انتخاب تامین‌کننده سبز است. برای این منظور، یک روش ترکیبی نو ین توسعه یافته است که شامل تکنیک دیمتل، مدل‌سازی ساختاری تفسیری و شبکه عصبی پیچشی مبتنی بر اجماع است. نتایج تجربی نشان داد که توانمندی در فناوری سبز، مدیریت کیفیت محصول و سیستم مدیریت زیست‌محیطی از مهم‌ترین عوامل موفقیت در این زمینه هستند. همچنین، نمودار سلسله‌مراتبی تعاملات بین عوامل را آشکار کرد که می‌تواند به مدیران در تصمیم‌گیری موثر کمک کند. این چارچوب جدید با رفع خلا موجود میان رو یکردهای کلاسیک تصمیم‌گیری و ساختاردهی دانش‌محور، ابزار کاربردی برای بهینه‌سازی فرآیند انتخاب تامین‌کننده سبز فراهم می‌آورد و موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی، اعتبار سازمانی و تعامل مثبت با نهادهای ناظر می‌شود.

در حوزه زنجیره‌تامین لارج، محمدی زنجیران و همکاران [22]، به بررسی و ارایه مدلی جامع برای انتخاب تامین‌کننده‌ای پرداختند که با اهداف راهبردی و نیازهای لجستیکی سازمان بیشترین هم‌راستایی را داشته باشد. بدین منظور، رو یکردهای ناب، چابک، تاب‌آور و سبز به‌صورت تلفیقی در چارچو بی مفهومی به‌کار گرفته شدند تا ابعاد مختلف عملکرد تامین‌کنندگان مورد ارزیابی قرار گیرد. در مرحله نخست، شاخص‌های کلیدی مرتبط با نیازهای لجستیکی سازمان از طریق مرور ادبیات شناسایی و با استفاده از روش تحلیل عملکرد چندهدفه، میزان اهمیت آن‌ها تعیین گردید. سپس به کمک ماتریس خانه کیفیت، وزن‌دهی به و یژگی‌های فنی تامین‌کنندگان انجام شد و عملکرد آن‌ها از طریق تابع زیان تاگوچی، نسبت به مقادیر هدف موردسنجش قرار گرفت. نتایج حاصل، مبنای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان قرار گرفت. همچنین، برای بررسی پایداری نتایج در سناریوهای مختلف، تحلیل حساسیت صورت گرفت و درنهایت، با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، اعتبار رتبه‌بندی‌ها مورد تایید قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان داد که مدل ارایه‌شده قابلیت بالایی در انتخاب تامین‌کنندگان هم‌راستا با رو یکردهای راهبردی سازمان دارد.

ساهو و همکاران [7]، به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده توانمند در زنجیره‌تامین صنعت تولیدی پرداختند و با هدف ارتقای عملکرد عملیاتی و پایداری، چارچو بی پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر رو یکردهای ناب، چابک، تاب‌آور و سبز ارایه نمودند. این چارچوب با استفاده از داده‌های میدانی جمع‌آوری‌شده از یک شرکت فعال در صنعت خودروسازی هند توسعه و اعتبارسنجی شده است. در طراحی مدل، ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل *AHP*، *DEMATEL*، *ANP*، *MOORA* توسعه‌یافته و *SAW* به‌کار گرفته شده و برای مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تصمیم‌گیری، از نظریه مجموعه‌های فازی بهره گرفته شده است. یافته‌های پژوهش منجر به شناسایی ۶۳ شاخص کلیدی در چارچوب *LARG* شد که از میان آن‌ها، شاخص‌هایی نظیر "چابکی در ارتباطات داخلی"، "انعطاف‌پذیری تولید"، "قابلیت ارتقای منابع" و "شفافیت در تبادل اطلاعات" به‌عنوان موثرترین معیارها در انتخاب تامین‌کنندگان ارزیابی شدند. چارچوب پیشنهادی با تکیه بر نظریه مبتنی بر دانش، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مدیران زنجیره‌تامین معرفی می‌شود که می‌تواند به بهبود عملکرد سازمانی، افزایش چابکی، ارتقای مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی و دستیابی به اهداف پایداری کمک شایانی نماید.

در پژوهشی دیگر، قزوینیان و همکاران [23]، به ارایه یک رو یکرد یکپارچه برای انتخاب تامین‌کننده بر اساس الگوی ناب، چابک، تاب‌آور، سبز و پایدار پرداختند. به‌منظور اعتبارسنجی این رو یکرد، از مدل‌سازی معادلات ساختاری و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی شهودی استفاده شد. ابتدا با انجام یک مرور نظام‌مند بر ادبیات، بیست‌وشش شاخص شناسایی گردید که در ادامه در قالب پنج معیار اصلی تجمیع شدند. سپس پرسشنامه‌ای بین ۲۳۷ نفر از فعالان شرکت‌های تولیدی پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران توزیع شد و داده‌های گردآوری‌شده با استفاده از تحلیل عاملی مرتبه سوم و روش حداقل مربعات جزیی تحلیل گردید. در ادامه، رو یکرد پیشنهادی در محیط فازی شهودی و با بهره‌گیری از نظرات خبرگان، به‌منظور ارزیابی چهار تامین‌کننده در قالب یک مطالعه موردی در صنعت خودروسازی به کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده، اثربخشی و کارایی رو یکرد ارایه‌شده را در اولو یت‌بندی و انتخاب تامین‌کنندگان منطبق با معیارهای سبز و پایدار نشان می‌دهد. درنهایت، این پژوهش با ارایه یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه، به ادبیات موجود در زمینه انتخاب تامین‌کننده افزوده و ابزاری کاربردی در اختیار مدیران برای ارتقای عملکرد زنجیره‌تامین پایدار قرار می‌دهد.

کابادایی و بکال [24]، محققین به مساله انتخاب تامین‌کننده به‌عنوان یکی از مسایل مهم در تصمیم‌گیری چندمعیاره تحت شرایط عدم قطعیت در زنجیره‌تامین لارج پرداختند. آن‌ها با هدف بهبود دقت در تصمیم‌گیری، به مقایسه سه نوع مجموعه فازی مختلف شامل مجموعه‌های فازی شهودی [1]، فازی کروی[2] و فازی فرمتین[3] پرداختند. روش مورداستفاده در این مطالعه، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی فرمتین[4] بود و مطالعه موردی در صنعت زنجیره‌تامین خودرو با تمرکز بر انتخاب تامین‌کنندگان منطبق با پارادایم‌های ناب، چابک، تاب‌آور و سبز (*LARG*) انجام شد. نتایج نشان داد که *FFS* نسبت به سایر مجموعه‌ها در مدیریت بهتر عدم قطعیت و نمایش تردید عملکرد موثرتری دارد.

شیخ زاده و همکاران [25]، به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده در زنجیره‌تامین دارویی با هدف کاهش اختلالات ناشی از شرایط بحرانی مانند پاندمی کرونا پرداختند. مطالعه به‌صورت موردی انجام شده و بر نقش چهار معیار ناب، چابک، تاب‌آور و سبز در انتخاب تامین‌کننده پیش و پس از شیوع کرونا تمرکز دارد. برای تحلیل چندبعدی مساله، از رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی شامل روش بهترین-بدترین و روش ارزیابی نسبت‌های جمعی[5] استفاده شده است. نتایج نشان داد که قبل از پاندمی، معیارهایی مانند کیفیت، همکاری، موجودی ایمن و محیط‌زیست دارای اهمیت بیشتری بوده‌اند، درحالی‌که پس از پاندمی، معیارهایی مانند تحویل به‌موقع، زمان تحویل، موجودی ایمن و محیط‌زیست اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. مدل ارایه‌شده به دلیل تلفیق معیارهای زنجیره‌تامین لارج در بستر زنجیره‌تامین دارویی نوآورانه بوده و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا در شرایط بحرانی، تامین‌کنندگان مناسب‌تری را انتخاب نمایند.

زینالی و همکاران [26]، به بررسی مساله ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان مواد اولیه در صنعت کشاورزی-غذایی پرداختند و تلاش کردند تا با تمرکز بر معیارهای الگوی لارج مبتنی بر مشتری، راهکاری موثر در مواجهه با پیچیدگی‌های محیط کسب‌وکار کنونی ارایه دهند. به منظور دستیابی به این هدف، ابتدا با اتکا به یک مطالعه موردی واقعی، معیارها و زیرمعیارهای کلیدی شناسایی شدند. سپس، یک مدل ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین توسعه یافت که از تلفیق روش تصادفی بهترین-بدترین و درخت تصمیم وزنی برای ارزیابی تامین‌کنندگان استفاده می‌کند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل نشان داد که معیارهای کلی، چابک-تاب‌آور، تاب‌آور، مبتنی بر مشتری و سبز، به ترتیب از بالاترین درجه اهمیت برخوردار هستند. همچنین، زیرمعیارهایی نظیر سطح خدمات، پایداری، هزینه، کیفیت، انعطاف‌پذیری تولید، سرعت تحویل، مدیریت ضایعات و ظرفیت ترمیم به‌عنوان مهم‌ترین عوامل موثر شناسایی شدند. درنهایت، یافته‌ها اثربخشی، اعتبار و قابلیت اطمینان مدل ارایه‌شده را تایید می‌نمایند.

۲-۲- ارزیابی تامین کنندگان با رویکرد داده محور

در پژوهشی نیری و همکاران [27]، به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش با تمرکز بر سه مفهوم کلیدی پاسخ‌گویی، پایداری و تاب‌آوری پرداختند. آن‌ها یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای طراحی کردند. در مرحله اول، با استفاده از روش جدید بهترین-بدترین فازی تصادفی، امتیاز تامین‌کنندگان بر اساس شاخص‌های مختلف محاسبه شد. در مرحله دوم، یک مدل چندهدفه برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش‌ها ارایه گردید.

در ادامه، برای مدیریت عدم‌قطعیت‌های ترکیبی، از یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر داده تحت عنوان بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی استفاده شد که بر پایه روش ساریما توسعه یافته است. سپس یک روش حل جدید با عنوان برنامه‌ریزی هدف چندگزینه‌ای چبیشف با تابع مطلوبیت (*CMCGP*-*UF*) طراحی و پیاده‌سازی شد. مطالعه موردی در صنعت تجهیزات پزشکی انجام شد. نتایج نشان داد که معیارهایی چون چابکی، هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای، کیفیت، تاب‌آوری و مدیریت پسماند از اهمیت بالایی برخوردارند. همچنین مشخص شد که افزایش نرخ اختلالات اثر منفی بر شاخص‌های پایداری دارد و میزان تقاضا نیز بر تمامی اهداف مدل تاثیر مستقیم می‌گذارد.

---

[1] Intuitionistic Fuzzy Set (IFS)
[2] Spherical Fuzzy Set (SFS)
[3] Formtine Fuzzy Set (FFS)
[4] Formtine Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FF-AHP)
[5] Additive Ratio Assessment (ARAS)

در پژوهشی لین و لو [28]، به بررسی بهینه‌سازی عملکرد تامین‌کنندگان اپل با تمرکز بر پایداری محیط‌زیستی پرداختند. آن‌ها از روش تحلیل پوششی داده‌های معکوس و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی و *k-NN* برای کاهش ۳۰% تا ۵۰% دی‌اکسیدکربن و ارزیابی عملکرد اقتصادی تامین‌کنندگان استفاده کردند. نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند به تصمیم‌گیری دقیق و پایدار در انتخاب تامین‌کنندگان کمک کرده و با اهداف توسعه پایدار هم‌راستا باشد.

در پژوهشی دیگر، ایسلام و همکاران [5]، به بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش در شرایط عدم قطعیت پرداختند. آن‌ها یک چارچوب سه‌مرحله‌ای ارایه دادند که در مرحله اول، از یک روش یادگیری عمیق تعدیل‌شده برای پیش‌بینی تقاضا استفاده شده و عملکرد آن با مدل‌های ساریما و *LGBM* مقایسه گردیده است. در مرحله دوم، از روش ترکیبی تحلیل مولفه‌های اصلی برای تعیین وزن تامین‌کنندگان بهره گرفته شده و در مرحله سوم، نتایج پیش‌بینی و وزن‌دهی در یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ترکیب شده‌اند. این مدل با داده‌های واقعی صنعت گوشت کانادا ارزیابی شده و نتایج نشان داد که مدل یادگیری عمیق توسعه‌یافته خطای پیش‌بینی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و درنظر گرفتن همبستگی بین محصولات، انتخاب تامین‌کنندگان و سفارشات را تغییر می‌دهد.

در پژوهشی دیگر، سعیدی فر و همکاران [29]، به ارایه یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه برای انتخاب تامین‌کنندگان در صنعت خودروسازی پرداختند که به‌صورت هم‌زمان معیارهای پایداری و تاب‌آوری را درنظر می‌گیرد. در این مدل، از روش بهترین-بدترین تصادفی برای وزن‌دهی معیارها، روش ویکور تصادفی برای ارزیابی تامین‌کنندگان و الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آینده آن‌ها استفاده شده است. مطالعه موردی در شرکت سایپا کاشان نشان داد که معیارهایی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف انرژی، هزینه و سطح موجودی ایمن بیشترین تاثیر را دارند. همچنین، مدل از دقت پیش‌بینی بالایی برخوردار است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب هم‌زمان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با الگوریتم‌های یادگیری ماشین در قالب یک چارچوب داده‌محور است.

اکبر و شیمشک [30]، به بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی انتخاب تامین‌کننده در بستر صنعت ۴/۰ پرداختند. آن‌ها با اشاره به چالش‌های ناشی از بحران‌های جهانی مانند پاندمی‌ها، بر ضرورت دیجیتالی‌سازی و استفاده از سیستم‌های هوشمند برای حفظ پایداری و تاب‌آوری زنجیره‌تامین تاکید کردند. در این راستا، رویکردهای سنتی که صرفا بر هزینه متمرکز بودند، ناکافی دانسته شده و استفاده از روش‌های چندمعیاره برای کاهش ریسک بلندمدت توصیه شده است. در این مطالعه، الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های مختلف به‌کار گرفته شدند. همچنین، از مدل‌های زبانی بزرگ مانند دیستیل‌جی‌پی‌تی۲ در سیستم‌های پشتیبان تصمیم استفاده شد تا با پردازش داده‌های متنی، انتخاب تامین‌کننده بر اساس معیارهایی نظیر قیمت، زمان تحویل، گمرک، مالیات، توان تولید، گارانتی و کیفیت به‌صورت دقیق‌تر انجام گیرد. نتایج نشان داد که این مدل مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند در زمان کوتاه و با دقت بالا، مناسب‌ترین تامین‌کننده را شناسایی کند. این پژوهش بر ظرفیت روزافزون مدل‌های زبانی در بهبود مدیریت زنجیره‌تامین در شرایط پیچیده بازار تاکید دارد.

جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین.
Table 1- Summary of previous studies.

محقق	ناب	چابک	تاب‌آوری	سبز	بعد فرهنگی	رویکرد داده محور	روش‌شناسی پژوهش
کوک و همکاران [13]	✓			✓		✓	شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس
گارسیا-بوئندیا و همکاران [14]	✓						معادلات ساختاری
فروزش نژاد و همکاران [15]	✓	✓		✓			روش بهترین بدترین فازی و مقایسه ناحیه مرزی
حفظار و همکاران [16]	✓	✓		✓		✓	بلاک‌چین
اولوتاس و همکاران [17]			✓			✓	تصمیم‌گیری خاکستری چندمعیاره

جدول ۱- ادامه.
Table 1- Continued.

محقق	ناب	چابک	تاب‌آوری	سبز	بعد فرهنگی	رویکرد داده محور	روش‌شناسی پژوهش
کوک و همکاران [13]	✓			✓		✓	شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس
گارسیا-بوئندیا و همکاران [14]	✓						معادلات ساختاری
فروزش نژاد و همکاران [15]	✓	✓		✓			روش بهترین بدترین فازی و مقایسه ناحیه مرزی
حففار و همکاران [16]	✓	✓		✓		✓	بلاک‌چین
اولوتاس و همکاران [17]			✓			✓	تصمیم‌گیری خاکستری چندمعیاره
سان و همکاران [18]			✓			✓	تصمیم‌گیری گروهی چندمعیاره فازی
بسررا و دیاز [19]			✓	✓			مدل ریاضی
آنواجونو و همکاران [20]				✓			تحلیل رگرسیون
اوگراه و همکاران [21]				✓			روش کمی (مصاحبه)
وو و چانگ [22]				✓			ساختار سلسله مراتبی
محمدی زنجیران و همکاران [22]	✓	✓	✓	✓			تحلیل عملکرد چندهدفه، ماتریس خانه کیفیت، تابع زیان تاگوچی
ساهو و همکاران [7]	✓	✓	✓	✓			دیمتل، مورا، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی
قزوینیان و همکاران [23]	✓	✓	✓	✓			معادلات ساختاری و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی
کابادایی و بکال [24]	✓	✓	✓	✓			روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی فرمتین
شیخ زاده و همکاران [25]	✓	✓	✓	✓			بهترین-بدترین، ارزیابی نسبت‌های جمعی
زینالی و همکاران [26]	✓	✓	✓	✓			بهترین-بدترین تصادفی، درخت تصمیم فازی
نیری و همکاران [27]				✓		✓	بهترین بدترین فازی تصادفی، بهینه‌سازی استوار فازی
لین و لو [28]				✓		✓	تحلیل پوششی داده‌های معکوس
ایسلام و همکاران [5]						✓	SARIMA, LGBM
سعیدی فر و همکاران [29]						✓	بهترین بدترین تصادفی، ویکور تصادفی، جنگل تصادفی
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	بهترین بدترین فازی، تحلیل پوششی داده‌های فازی، الگوریتم جنگل تصادفی

۳-۲- شکاف‌های پژوهش و سهم پژوهش حاضر

مروری پیشینه پژوهش در حوزه انتخاب تامین‌کننده در چارچوب زنجیره‌تامین لارج (شامل ابعاد ناب، چابک، تاب‌آور و سبز) نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در توسعه مدل‌های چندمعیاره، هنوز خلاهای مهمی در این حوزه باقی مانده‌اند که پژوهش حاضر درصدد پر کردن آن‌هاست.

نخست، اغلب مطالعات پیشین تنها بر یکی یا چند بعد از مدل لارج تمرکز داشته و کمتر پژوهشی به تلفیق جامع هر چهار بعد در قالب یک مدل یکپارچه پرداخته است. این در حالی است که تصمیم‌گیری موثر در محیط‌های رقابتی و ناپایدار مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان مولفه‌های کارایی عملیاتی، انعطاف‌پذیری، تاب‌آوری و الزامات زیست‌محیطی است. دوم، بعد فرهنگی به‌عنوان یکی از عوامل نرم اما تاثیرگذار در موفقیت روابط تامین، در بیشتر مدل‌های ارزیابی تامین‌کنندگان مورد غفلت قرار گرفته است. تعامل میان سازمان‌هایی با پیش‌زمینه‌های فرهنگی متفاوت، به‌ویژه در زنجیره‌های تامین چندملیتی، نیازمند درک عمیق از مولفه‌های فرهنگی نظیر درک متقابل، انعطاف‌پذیری فرهنگی و توانایی برقراری ارتباط موثر است. درحالی‌که مدل‌های سنتی فرهنگی مانند *Hofstede* یا *GLOBE* به تحلیل سطح ملی محدودند، نیاز به شاخص‌های عملیاتی‌شده در سطح سازمانی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. سوم، بخش عمده‌ای از مدل‌های موجود، رویکردی ایستا داشته و توانایی پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان را ندارند. در فضای پویای امروزی، اتکای صرف بر داده‌های تاریخی بدون تحلیل آینده‌نگر می‌تواند تصمیم‌گیری‌ها را با ریسک‌های جدی مواجه سازد.

در پاسخ به این شکاف‌ها، پژوهش حاضر چند نوآوری کلیدی ارایه می‌دهد:

۱. درج مولفه‌های فرهنگی سازمانی در مدل ارزیابی :با تعریف و عملیاتی‌سازی سه شاخص رفتاری "درک فرهنگ"، "ارتباطات موثر" و "انعطاف‌پذیری فرهنگی"، مدل پیشنهادی گامی نوین در تلفیق جنبه‌های نرم با تحلیل‌های سخت‌افزاری در ارزیابی تامین‌کنندگان برداشته است. اثربخشی این نوآوری از طریق آزمون آماری t جفتی نیز تایید شده است.
۲. کاربرد الگوریتم یادگیری ماشین با رویکرد پیش‌بینانه: به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان، بعد آینده‌نگر تصمیم‌گیری را تقویت کرده و امکان انتخاب تامین‌کنندگان با ثبات عملکردی بیشتر را فراهم می‌سازد.

در مجموع، این پژوهش با طراحی یک مدل تصمیم‌گیری ترکیبی (فازی-ماشین‌محور) و اجرای آن در قالب یک مطالعه موردی واقعی در صنعت سلولزی ایران، سهم معناداری در توسعه ادبیات علمی حوزه انتخاب تامین‌کننده و تصمیم‌گیری زنجیره‌تامین ایفا می‌کند.

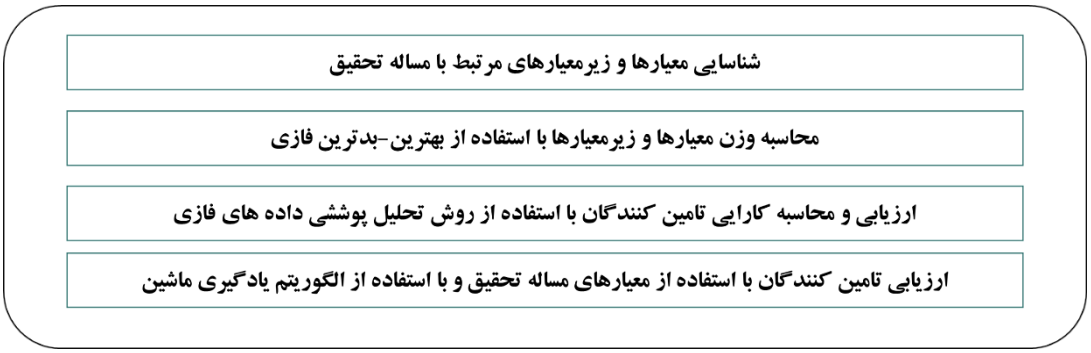
علاوه بر موارد فوق، این پژوهش با تمرکز بر صنعت سلولزی ایران و انجام مطالعه موردی در شرکت پارس سلولز، چارچوبی عملیاتی و بومی ارایه کرده که قابلیت تعمیم به سایر صنایع با ساختارهای مشابه را نیز داراست. ترکیب روش‌های تحلیل پوششی داده‌های فازی، بهترین-بدترین فازی و یادگیری ماشین در قالب یک چارچوب منسجم، سهم عمده‌ای در توسعه دانش موجود در حوزه تصمیم‌گیری زنجیره‌تامین ایفا می‌کند.

۳- روش تحقیق

همان‌طور که در ابتدای پژوهش بیان شد، در این پژوهش، مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی شامل سه مرحله اصلی می‌باشد که به‌صورت پیوسته و مکمل یکدیگر عمل می‌کنند.

در مرحله نخست، با بهره‌گیری از تحلیل محتوا بر روی ادبیات موضوع و داده‌های کیفی، معیارها و زیرمعیارهای کلیدی مرتبط با انتخاب تامین‌کنندگان استخراج شده‌اند. این معیارها شامل ابعاد فرهنگی، فنی و اقتصادی مرتبط با چارچوب لارج می‌باشند. در مرحله دوم، معیارهای شناسایی‌شده با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی وزن‌دهی شده و اولویت‌بندی می‌شوند که این گام، ورودی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره را تشکیل می‌دهد. در مرحله سوم، برای ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و ابهامات داده‌ها، از تحلیل پوششی داده‌های فازی استفاده شده است. درنهایت، الگوریتم جنگل تصادفی به‌منظور پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان به کار گرفته شده است که امکان تصمیم‌گیری آینده‌نگر را فراهم می‌آورد. این مراحل به‌صورت یک فرآیند گام‌به‌گام و متوالی پیاده‌سازی شده‌اند که ارتباط منطقی و جریان داده‌ها در آن‌ها به‌صورت شماتیک در **شکل ۱** نشان داده شده است. شایان‌ذکر است که در این تحقیق، داده‌ها و اطلاعات مربوط به تامین‌کنندگان از دو منبع

اصلی گردآوری شده‌اند: ۱- داده‌های واقعی عملکردی شامل شاخص‌هایی مانند قیمت، کیفیت محصولات، مصرف انرژی، سرعت تحویل و نرخ بازیابی که از مستندات و گزارش‌های داخلی شرکت پارس سلولز به‌دست آمده است و ۲- داده‌های کیفی و وزنی حاصل از مشاوره و نظرسنجی از خبرگان و مدیران حوزه زنجیره‌تامین همان شرکت. فرآیند گردآوری داده‌های کیفی شامل جلسات کارشناسی با حضور متخصصان و مدیران زنجیره‌تامین بوده که در آن معیارهای انتخاب تامین‌کنندگان تعیین و وزن‌دهی شده‌اند. ترکیب داده‌های واقعی و نظرات خبرگان باعث شده مدل تصمیم‌گیری ارایه‌شده هم از جنبه عملی و واقعی و هم از نظر تخصصی و تحلیلی استحکام بیشتری داشته باشد.


شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله تحقیق
محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از بهترین-بدترین فازی
ارزیابی و محاسبه کارایی تامین کنندگان با استفاده از روش تحلیل پوششی داده های فازی
ارزیابی تامین کنندگان با استفاده از معیارهای مساله تحقیق و با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین

شکل ۱- چارچوب کلی تحقیق حاضر.
Figure 1- Overall research framework.

مرحله ۱ - شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مساله تحقیق

در مرحله اول از این پژوهش، پس از مطالعه دقیق پیشینه تحقیقاتی مرتبط با موضوع، پرتکرارترین معیارها شناسایی شده و سپس با همکاری متخصصان و کارشناسان حوزه‌های مربوطه، معیارهای کلیدی و مرتبط برای مطالعه انتخاب گردیدند. در این فرآیند، توجه ویژه‌ای به بعد فرهنگی به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار در انتخاب معیارهای تحقیقاتی معطوف شد. این رویکرد به‌ویژه ازآن‌جهت اهمیت دارد که فرهنگ می‌تواند تاثیرات قابل‌توجهی بر نحوه تعاملات و تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت زنجیره‌تامین داشته باشد. درنتیجه، متخصصان با درنظر گرفتن تنوع فرهنگی و اهمیت آن در محیط‌های کاری، ابعاد مختلف فرهنگ را به‌طور جامع در انتخاب معیارها لحاظ کردند [8]، [11].

در این پژوهش، برای عملیاتی‌سازی بعد فرهنگی، ابتدا با مرور گسترده ادبیات تخصصی و انجام مشاوره با خبرگان حوزه زنجیره‌تامین، سه مولفه کلیدی فرهنگی شناسایی شدند که نقش اساسی در بهبود همکاری و تعاملات زنجیره‌تامین دارند:

درک فرهنگ: به معنای توانایی سازمان در شناخت و احترام به تفاوت‌های فرهنگی شامل ارزش‌ها، هنجارها و رفتارهای متنوع میان شرکای تجاری است. این مولفه باعث کاهش سوتفاهم و افزایش هماهنگی در تعاملات بین سازمانی می‌شود.

ارتباطات موثر: توانایی انتقال پیام‌ها و اطلاعات به شیوه‌ای که درک درستی از طرفین ایجاد کند. این شامل تطبیق سبک‌های ارتباطی با تفاوت‌های فرهنگی، فهم پیام‌های غیرکلامی و به‌کارگیری زبان مناسب است.

انعطاف‌پذیری فرهنگی: قابلیت سازمان و افراد در تغییر و تطبیق رفتارها، فرآیندها و رویکردهای کاری با ویژگی‌ها و الزامات فرهنگی طرف مقابل به‌منظور تسهیل همکاری موثر.

معیارهای مرتبط با هر یک از این ابعاد فرهنگی از طریق پرسشنامه‌ای طراحی شده و با همکاری خبرگان حوزه زنجیره‌تامین ارزیابی و وزن‌دهی شدند. در فرآیند مدل‌سازی، این سه بعد به‌عنوان شاخص‌های مستقل فرهنگی در کنار سایر ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی وارد مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره شدند. این روش امکان سنجش دقیق و عملیاتی تاثیر بعد فرهنگی بر انتخاب تامین‌کنندگان را فراهم ساخته است [9]، [11]. در ادامه، معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان در ابعاد سبز، تاب‌آوری، چابکی و ناب‌بودن زنجیره‌تامین، با تاکید بر اهمیت بعد فرهنگی موردبررسی قرار خواهند گرفت.

جدول ۲- معیارهای سبز بودن.
Table 2- Green criteria.

معیار	توصیف	مرجع
رعایت¬استانداردهای زیست‌محیطی	تامین‌کننده باید استانداردهای زیست‌محیطی مربوط به صنعت خود را رعایت کند.	[31]
مدیریت پسماند	تامین‌کننده باید سیستم مدیریت پسماند موثری داشته باشد و به دنبال کاهش، بازیافت و دفع صحیح پسماندها باشد.	[32]
مصرف انرژی	سطح تامین‌کننده از نظر مصرف انرژی	[33]، [34]
کاهش گازهای گلخانه‌ای	تامین‌کننده باید به دنبال کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در فعالیت‌های خود باشد.	[35]، [36]
استفاده از مواد اولیه سازگار با محیط‌زیست	تامین‌کنندگانی که از مواد بازیافتی، زیست‌تجزیه‌پذیر یا کم‌خطر برای محیط‌زیست استفاده می‌کنند.	[31]

جدول ۳- معیارهای تاب‌آوری.
Table 3- Resilience criteria.

معیار	توصیف	مرجع
مدیریت ریسک و پیش‌بینی	توانایی تامین‌کننده در شناسایی و ارزیابی ریسک‌های احتمالی و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه	[37]
شفافیت	سطح تامین کننده از نظر ارایه اطلاعات کامل به اعضای شبکه	[38]
نرخ عیب	نسبت محصولات معیوب به کل محصولات تولیدشده توسط تامین‌کننده	[39–41]
دردسترس بودن	میزان دردسترس بودن محصولات و خدمات تامین‌کننده	[42]، [43]
بازیابی	توانایی بازگشت به حالت عادی پس از وقوع اختلال در زنجیره‌تامین	[44]، [45]

جدول ۴- معیارهای چابکی.
Table 4- Agile criteria.

معیار	توصیف	مرجع
سرعت تحویل	تامین‌کننده باید قادر به تحویل سریع محصولات و خدمات باشد.	[46]
انعطاف‌پذیری در تولید	تامین‌کننده باید بتواند به‌سرعت میزان تولید خود را متناسب با تغییرات تقاضا تنظیم کند.	[47]
همکاری و ارتباطات موثر	ارتباط شفاف، سریع و دوطرفه بین تامین‌کننده و سازمان، با تاکید بر به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات حیاتی و هماهنگی	[7]
یادگیری و تطبیق	توانایی تامین‌کننده در یادگیری سریع از تغییرات محیطی و تقاضای بازار و انطباق فرآیندها، فناوری‌ها و رویکردها	[48]، [49]
توانایی پاسخگویی به سفارشات فوری	تامین‌کننده باید بتواند به سفارشات فوری مشتریان پاسخ دهد.	[47]، [50]

جدول ۵- معیارهای ناب بودن.
Table 5- Lean criteria.

معیار	توصیف	مرجع
کیفیت محصولات	تامین‌کننده باید محصولات با کیفیت بالا ارایه دهد.	[15]
قیمت	تامین‌کننده باید قیمت‌های رقابتی ارایه دهد.	[15]، [51]
کاهش ضایعات	توانایی کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری در زنجیره‌تامین.	[48]
زمان تحویل	تامین‌کننده باید به‌موقع محصولات را تحویل دهد.	[52]
سیستم مدیریت کیفیت	تامین‌کننده باید سیستم مدیریت کیفیت موثری داشته باشد.	[52]

مرحله ۲- محاسبه وزن با روش بهترین-بدترین فازی

برای تعیین وزن معیارهای کلیدی، در این پژوهش از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین-بدترین فازی استفاده شده استیک رویکرد نوین در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با هدف تعیین دقیق وزن معیارها بر پایه مقایسات ترجیحی تصمیم‌گیرنده طراحی شده است. این روش با بهره‌گیری

از منطق مقایسه‌ای، تلاش می‌کند تا از طریق تحلیل اولویت‌های ذهنی تصمیم‌گیرنده، درجه اهمیت نسبی هر معیار را با دقت بالایی استخراج کند. آنچه این روش را از سایر روش‌های مشابه متمایز می‌سازد، سازگاری بالای نتایج، نیاز به تعداد مقایسه‌های کمتر و کاهش خطای ناشی از ناسازگاری‌های ذهنی در قضاوت‌های انسانی است [53]، [54].

روش بهترین بدترین فازی مبتنی بر منطق فازی، قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام موجود در ارزیابی‌های کیفی تصمیم‌گیرندگان را دارد و نسبت به روش‌های سنتی، دقت و انعطاف‌پذیری بالاتری در وزن‌دهی فراهم می‌کند. در این روش، ابتدا بهترین (مهم‌ترین) و بدترین (کم‌اهمیت‌ترین) معیارها از میان معیارهای انتخاب شده به‌وسیله خبرگان تعیین می‌شود. سپس مقایسات زوجی میان بهترین معیار با سایر معیارها و همچنین میان سایر معیارها با بدترین معیار با استفاده از متغیرهای زبانی فازی انجام می‌گیرد. متغیرهای زبانی به‌صورت اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی شده‌اند که توابع عضویت آن‌ها در **جدول ۶** آورده شده است. این توابع عضویت امکان بیان دقیق‌تر شدت اهمیت هر مقایسه را فراهم می‌آورند و درنهایت، با حل مسایل بهینه‌سازی فازی، وزن‌های معیارها و زیرمعیارها استخراج می‌شود. توابع عضویت این اعداد فازی مثلثی به‌صورت تابع مثلثی مشخص شده‌اند که هر تابع عضویت با سه پارامتر (a, b, c) تعریف می‌شود؛ جایی که b نقطه اوج عضویت است و a و c نقاط شروع و پایان تابع هستند. برای مثال، سطح "کاملا مهم" با تابع عضویت مثلثی (۴٫۵ ,۴ ,۳٫۵) نمایش داده شده است. این توابع اجازه می‌دهند شدت اهمیت هر مقایسه به‌صورت نرم و با انعطاف بیان شود و دقت وزن‌دهی افزایش یابد. تعریف دقیق این متغیرها و توابع عضویت در **جدول ۶** آورده شده است و نقش مهمی در تحلیل دقیق ترجیحات خبرگان ایفا می‌کند.

این روش به دلیل کاهش حجم مقایسات نسبت به روش‌های مشابه، سهولت در پیاده‌سازی و قدرت مدیریت عدم قطعیت در نظرات خبرگان، در این پژوهش انتخاب شده است. جزییات مراحل اجرای روش بهترین بدترین فازی و فرمولاسیون ریاضی آن در پیوست مقاله ارایه شده است [55]، [56].

جدول ۶- متغیرهای زبانی روش بهترین-بدترین فازی.
Table 6- Linguistic variables in FBWM method.

متغیر زبانی	اهمیت برابر (EI)	اهمیت کم (WI)	نسبتا مهم (FI)	خیلی مهم (VI)	کاملا مهم (AI)
تابع عضویت	(1,1,1)	(0.6667,1,1.5)	(1.5,2,2.5)	(2.5,3,3.5)	(3.5,4,4.5)

مرحله ۳- ارزیابی تامین کنندگان با روش تحلیل پوششی داده‌های فازی

همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید، در این بخش از پژوهش، کارایی تامین‌کنندگان بالقوه شرکت در سال‌های مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های فازی ارزیابی می‌گردد [57]. تحلیل پوششی داده‌ها یک روش غیرپارامتری مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است که برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری[1] با ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد به کار می‌رود. در نسخه سنتی تحلیل پوششی داده‌ها، داده‌های ورودی و خروجی به‌صورت دقیق و قطعی فرض می‌شوند. با این‌حال، در شرایط واقعی، داده‌های مشاهده‌شده ممکن است دارای عدم قطعیت یا نادقیق باشند [58–60]. به‌منظور مدیریت این عدم قطعیت، تئوری مجموعه‌های فازی به روش تحلیل پوششی داده‌ها اضافه شده است که منجر به توسعه مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های فازی شده است [61]. در مدل‌های *FDEA*، داده‌های ورودی و خروجی می‌توانند به‌صورت اعداد فازی، نظیر اعداد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای، نمایش داده شوند. این مدل‌ها بر اساس روش‌های مختلفی ازجمله روش تحمل، روش مبتنی بر-α سطح، روش رتبه‌بندی فازی و روش امکان، دسته‌بندی می‌شوند. هر یک از این روش‌ها، رویکرد متفاوتی را برای مدل‌سازی و حل مسایل تحلیل پوششی داده‌ها در شرایط فازی ارایه می‌دهند [62]. مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها می‌توانند ورودی‌محور یا خروجی‌محور باشند. ازآنجاکه توسعه منابع اولیه و ورودی‌های یک تامین‌کننده معمولا دشوارتر از بهینه‌سازی خروجی‌های آن است، این مطالعه بر بهینه‌سازی خروجی‌های تامین‌کنندگان با درنظر گرفتن ورودی‌ها،

[1] Decision-Making Units (DMU)

خروجی‌ها و کارایی آن‌ها تمرکز دارد [63]، [64]. گام‌های روش تحلیل پوششی داده‌های فازی که در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفته است، به‌صورت کامل در فایل پیوست ارایه شده است.

الگوریتم جنگل تصادفی

در این پژوهش، به‌منظور ایجاد مدلی قابل‌اعتماد و کارآمد برای پیش‌بینی امتیاز کارایی تامین‌کنندگان، از الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین تحت عنوان رگرسیون جنگل تصادفی استفاده شده است. این الگوریتم که یکی از روش‌های قدرتمند و محبوب در زمینه یادگیری ماشین به‌شمار می‌رود، با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم، توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی را دارد [28]، [65]، [66]. رگرسیون جنگل تصادفی با استفاده از ترکیب نتایج چندین درخت تصمیم، دقت پیش‌بینی را افزایش داده و از بیش‌برازش[1] جلوگیری می‌کند. دلیل انتخاب این الگوریتم در این پژوهش، توانایی آن در تحلیل داده‌های حجیم و متغیرهای متنوع، پایداری در مواجهه با داده‌های نو یزی و ارایه پیش‌بینی‌های دقیق در مسایلی است که شامل عوامل پیچیده و چندبعدی، همانند ارزیابی کارایی تامین‌کنندگان، هستند [66]، [67]. در این راستا، مجموعه داده‌های مربوط به تامین‌کنندگان شامل شاخص‌های کلیدی عملکرد و معیارهای مرتبط با مدیریت زنجیره‌تامین، به‌عنوان ورودی به مدل ارایه شده‌اند و خروجی مدل، امتیاز پیش‌بینی‌شده کارایی تامین‌کنندگان است. استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل قابلیت تفسیر مناسب نتایج و توانایی در رتبه‌بندی اهمیت ویژگی‌ها، امکان ارایه تحلیل‌های دقیق‌تر و کاربردی‌تر در فرآیند تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند مراحل رگرسیون جنگل تصادفی به تفصیل در فایل پیوست ارایه می‌شود [68].

۴- مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش بر شرکت "پارس سلولز" به‌عنوان یکی از بازیگران اصلی صنعت سلولزی ایران متمرکز شده است. این شرکت با دارا بودن شبکه گسترده‌ای از تامین‌کنندگان داخلی، نقش کلیدی در تامین مواد اولیه و تولید محصولات سلولزی ایفا می‌کند و به همین دلیل به‌عنوان نمونه مناسبی برای بررسی و ارزیابی مدل تصمیم‌گیری داده‌محور انتخاب شده است.

در این تحقیق، ۱۹ تامین‌کننده کلیدی فعال در زنجیره‌تامین شرکت پارس سلولز مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. این تامین‌کنندگان مسئول تامین انواع مواد اولیه سلولزی ازجمله کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینگ می‌باشند که اهمیت آن‌ها در تضمین کیفیت و پایداری زنجیره‌تامین به‌وضوح قابل‌مشاهده است. مشخصات دقیق این تامین‌کنندگان، شامل نام، نوع مواد تامین‌شده و ویژگی‌های مرتبط، در **جدول ۵** مقاله ارایه شده است که تصویر واضحی از دامنه و تنوع نمونه‌های مطالعه فراهم می‌آورد.

داده‌های مورداستفاده در این پژوهش از دو منبع اصلی گردآوری شده‌اند: ۱- داده‌های واقعی عملکردی که شامل شاخص‌هایی مانند قیمت، کیفیت محصولات، مصرف انرژی، سرعت تحویل و نرخ بازیابی است و از طریق مستندات و گزارش‌های داخلی شرکت پارس سلولز به‌دست آمده‌اند و ۲- داده‌های کیفی که از طریق جلسات مشاوره و نظرسنجی با حضور خبرگان و مدیران حوزه زنجیره‌تامین این شرکت جمع‌آوری شده‌اند. این داده‌های کیفی شامل معیارهای رفتاری و فرهنگی تامین‌کنندگان مانند "درک فرهنگی"، "ارتباطات موثر" و "انعطاف‌پذیری فرهنگی" می‌باشد.

فرآیند گردآوری داده‌های کمی شامل استخراج و پالایش دقیق گزارش‌های عملکردی شرکت بوده است تا صحت و جامعیت داده‌ها تضمین شود. داده‌های کیفی نیز با بهره‌گیری از پرسشنامه‌های ساختاریافته و متغیرهای زبانی در جلسات کارشناسی جمع‌آوری شده و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین-بدترین فازی وزن‌دهی شده‌اند. این روش امکان درنظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و تفاوت دیدگاه‌ها را فراهم می‌آورد و به‌دقت تحلیل کمک می‌کند. این ترکیب داده‌های واقعی و دیدگاه‌های تخصصی خبرگان، مدل پیشنهادی را قادر ساخته است تا هم عملکرد واقعی

[1] Overfitting

تامین‌کنندگان را به‌دقت منعکس کند و هم ابعاد فرهنگی و رفتاری را در تحلیل‌های خود لحاظ نماید. این ویژگی موجب افزایش استحکام علمی و کاربردی بودن مدل شده و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در مدیریت زنجیره‌تامین را بهبود می‌بخشد.

علاوه بر این، ساختار داده‌ها و چارچوب تحلیل ارایه شده قابلیت تعمیم به صنایع دیگر با ساختار زنجیره‌تامین مشابه را دارد. به‌این‌ترتیب، مدل توسعه‌یافته علاوه بر کاربرد در صنعت سلولزی، می‌تواند به‌عنوان الگو یی کارآمد در صنایع غذایی، پتروشیمی، لوازم‌خانگی و سایر حوزه‌های صنعتی مورداستفاده قرار گیرد. درنهایت، **جدول ۷** شامل اطلاعات توصیفی مربوط به تامین‌کنندگان منتخب شرکت پارس سلولز است که نوع مواد تامین‌شده و ویژگی‌های هر تامین‌کننده را به‌صورت خلاصه ارایه می‌کند. این داده‌ها به‌عنوان ورودی در فرآیند ارزیابی عملکرد مورداستفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۷- مشخصات تامین کنندگان قطعات سلولز.
Table 7- Details of cellulose suppliers.

تامین‌کننده	نام	قطعات سلولز
1	کاغذ هفت‌تپه پارس	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
2	چوکا تالش	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
3	هفت‌تپه فارس	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
4	پویا آیش مازندران	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
5	چوب و کاغذ مازندران	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
6	کاغذسازی کاوه	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
7	ستاره گیلان	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
8	دلتا سلولز	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
9	صدرا برگ	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
10	پردیس کاغذ نیشابور	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
11	افرنگ نور	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
12	ارژن کاغذ مازندران	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
13	آمل چوکا	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
14	اطلس برگ	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
15	صنایع کاغذسازی کهریزک	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
16	راشا کاسپین قزوین	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
17	پاژ پارس	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
18	آسان پک قزوین	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک
19	کاغذسازی نیل گرمسار	کاغذ لاینر، تست لاینر و فلوتینک

۵- نتایج عددی

۵-۱- نتایج روش بهترین-بدترین فازی

این بخش به تحلیل یافته‌های حاصل از نخستین مرحله پژوهش اختصاص دارد. در این مرحله، داده‌های موردنیاز جهت اجرای روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین-بدترین فازی گردآوری شده و خروجی‌های به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای اجرای این روش، ابتدا بر اساس نظر خبرگان، معیارهای اصلی شناسایی و سپس بهترین و بدترین معیارها مشخص شدند. پس‌ازآن، مقایسات زوجی میان معیار برتر و سایر معیارها و نیز میان سایر معیارها با معیار ضعیف‌تر، انجام گرفت. فرآیند مشابهی نیز برای زیرمعیارهای هر دسته صورت پذیرفت، به‌طوری‌که مقایسات زوجی میان بهترین زیرمعیار و سایر زیرمعیارهای مربوطه و همچنین میان سایر زیرمعیارها با ضعیف‌ترین زیرمعیار در هر گروه انجام شد. کلیه این مقایسات با استفاده از متغیرهای زبانی تعریف‌شده در **جدول ۸** صورت پذیرفت.

خروجی نهایی این مرحله در **جدول ۹** ارایه شده است. طبق نتایج حاصل، معیار تاب‌آوری بالاترین وزن را در میان معیارهای اصلی کسب کرده، درحالی‌که معیار ناب بودن کمترین اهمیت نسبی را به خود اختصاص داده است. در میان زیرمعیارهای مربوط به بعد سبز بودن، مصرف انرژی و

کاهش گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان مهم‌ترین مولفه‌ها شناسایی شده‌اند. همچنین، مدیریت ریسک و بازیابی در میان زیرمعیارهای تاب‌آوری بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند.

در ارتباط با معیار ناب بودن، دو زیرمعیار قیمت و کیفیت محصولات از اهمیت بیشتری نسبت به سایر گزینه‌ها برخوردار بوده‌اند. همچنین در بخش چابکی، انعطاف‌پذیری تولید و سرعت تحویل به‌عنوان اصلی‌ترین زیرمعیارها شناسایی شده‌اند. برآیند این تحلیل نشان می‌دهد که مجموعه‌ای از زیرمعیارها شامل قیمت، مصرف انرژی، کیفیت، بازیابی و سرعت تحویل، نقش کلیدی در ارزیابی تامین‌کنندگان در چارچوب زنجیره‌تامین لارج ایفا می‌کنند؛ به‌ویژه زمانی که بعد فرهنگی نیز در این ارزیابی لحاظ شود.

جدول ۸- متغیرهای زبانی روش بهترین-بدترین.

Table 8- Linguistic **variables of the best–worst method.**

متغیر زبانی	اهمیت برابر (EI)	اهمیت کم (WI)	نسبتا مهم (FI)	خیلی مهم (VI)	کاملا مهم (AI)
تابع عضویت	(1,1,1)	(0.6667,1,1.5)	(1.5,2,2.5)	(2.5,3,3.5)	(3.5,4,4.5)

جدول ۹- وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها.

Table 9- Final weight of criteria and sub-criteria.

معیار	وزن معیار	زیر معیار	وزن اولیه معیار	وزن نهایی
سبز	0.2493	رعایت¬استانداردهای زیست‌محیطی	0.1897	0.0473
		مدیریت پسماند	0.1821	0.0454
		مصرف انرژی	0.2321	0.0579
		کاهش گازهای گلخانه‌ای	0.1984	0.0495
		تولید سبز	0.1905	0.0475
تاب‌آوری	0.2593	مدیریت ریسک و پیش‌بینی	0.2102	0.0515
		شفافیت	0.1859	0.0482
		نرخ عیب	0.1943	0.0504
		در دسترس بودن	0.1984	0.0514
		بازیابی	0.2064	0.0535
ناب بودن	0.2461	قیمت	0.1938	0.055
		کیفیت محصولات	0.2194	0.0539
		زمان تحویل	0.2047	0.0454
		کاهش ضایعات	0.2015	0.0471
		سیستم مدیریت کیفیت	0.1894	0.0466
چابکی	0.2484	انعطاف‌پذیری در تولید	0.2057	0.0511
		همکاری و ارتباطات موثر	0.1847	0.0459
		سرعت تحویل	0.2138	0.0531
		یادگیری و تطبیق	0.1946	0.0483
		پاسخگویی به نیازهای مشتریان	0.2015	0.0501

۲-۵- نتایج تحلیل پوششی داده‌های فازی

در این بخش از پژوهش، به‌منظور ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان، از مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی بهره گرفته شده است. در گام نخست، متغیرهای ورودی و خروجی مدل با استناد به شاخص‌های شناسایی‌شده در بخش معیارهای ارزیابی و با تایید خبرگان حوزه زنجیره‌تامین تعیین گردید. به‌طور مشخص، قیمت و مصرف انرژی به‌عنوان ورودی‌های مدل و بازیابی، کیفیت محصولات و سرعت تحویل به‌عنوان خروجی‌ها درنظر گرفته شدند.

برای سنجش بهره‌وری نسبی تامین‌کنندگان، از رویکرد خروجی‌محور در تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است. در این ساختار، ورودی‌ها به‌عنوان منابع محدود درنظر گرفته شده‌اند و هدف اصلی، حداکثرسازی خروجی‌ها بدون افزایش منابع ورودی است. این چارچوب تحلیلی امکان شناسایی تامین‌کنندگانی را فراهم می‌سازد که در استفاده از منابع ثابت، بیشترین خروجی را تولید کرده و درنتیجه، کاراتر محسوب می‌شوند. چنین تحلیلی می‌تواند نقش مهمی در تصمیم‌سازی‌های راهبردی برای انتخاب و توسعه همکاری با تامین‌کنندگان ایفا کند.

برای اجرای مدل، داده‌های حاصل از نظرسنجی میان خبرگان حوزه به‌عنوان مبنای تحلیل قرار گرفت. **جدول ۱۰** متغیرهای زبانی تعریف‌شده برای تعیین میزان اهمیت معیارها را نمایش می‌دهد. با استفاده از این متغیرها، اوزان ترجیحی هر یک از پاسخ‌دهندگان در مقایسه میان معیارها محاسبه شد. در گام بعد، این اوزان بر روی داده‌های عملکردی مربوط به ۱۹ تامین‌کننده اعمال گردید. حاصل این مرحله، تشکیل یک ماتریس تصمیم فازی تجمیع‌شده بود که در آن، وزن نهایی هر معیار بر اساس اجماع نظرات خبرگان تعیین شد. این ماتریس، پایه ورودی برای اجرای مدل تحلیل پوششی داده‌ها محسوب می‌شود. در ادامه، داده‌های خام فازی با استفاده از روش‌های استاندارد نرمال‌سازی شدند تا امکان مقایسه و تحلیل دقیق‌تر فراهم شود. نتایج حاصل از فرآیند نرمال‌سازی در **جدول ۹** گزارش شده است و این داده‌ها به‌عنوان ورودی نهایی در اجرای مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی مورداستفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱۰- متغیرهای زبانی.
Table 10- Linguistic variables.

درجه اهمیت	اعداد فازی
کم‌اهمیت (WI)	(0.1,0.1,0.3)
نسبتا مهم (MI)	(0.1,0.3,0.5)
مهم (I)	(0.3,0.5,0.7)
بسیار مهم (SI)	(0.5,0.7,0.9)
به‌شدت مهم (EI)	(0.7,0.9,0.9)

جدول ۱۱- ماتریس نرمال شده وزنی.
Table 11- Weighted normalized matrix.

تامین‌کننده	قیمت	مصرف انرژی	کیفیت	بازیابی	سرعت تحویل
تامین‌کننده ۱	(0.11,0.2,1)	(0.11,0.17,0.33)	(0.33,0.56,0.78)	(0.11,0.47,0.78)	(0.11,0.42,0.78)
تامین‌کننده ۲	(0.11,0.19,0.33)	(0.11,0.19,1)	(0.33,0.60,1)	(0.11,0.51,0.78)	(0.11,0.42,0.78)
تامین‌کننده ۳	(0.11,0.19,0.33)	(0.11,0.2,1)	(0.33,0.64,1)	(0.11,0.56,1)	(0.11,0.51,0.78)
تامین‌کننده ۴	(0.11,0.19,0.33)	(0.11,0.2,1)	(0.33,0.60,1)	(0.11,0.56,1)	(0.11,0.51,0.78)
تامین‌کننده ۵	(0.11,0.19,0.33)	(0.11,0.19,0.33)	(0.33,0.69,1)	(0.11,0.51,0.78)	(0.11,0.51,0.78)
تامین‌کننده ۶	(0.11,0.17,0.33)	(0.11,0.19,0.33)	(0.11,0.51,1)	(0.11,0.47,0.78)	(0.11,0.47,0.78)
تامین‌کننده ۷	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.16,1)	(0.11,0.29,0.78)	(0.11,0.29,0.78)	(0.11,0.29,0.78)
تامین‌کننده ۸	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.16,1)	(0.11,0.33,0.78)	(0.11,0.29,0.78)	(0.11,0.29,0.78)
تامین‌کننده ۹	(0.14,0.24,1)	(0.11,0.16,1)	(0.11,0.56,1)	(0.11,0.29,0.78)	(0.11,0.38,0.78)
تامین‌کننده ۱۰	(0.11,0.16,1)	(0.11,0.17,0.33)	(0.11,0.47,1)	(0.11,0.38,0.78)	(0.11,0.42,0.78)
تامین‌کننده ۱۱	(0.11,0.19,1)	(0.11,0.19,1)	(0.11,0.47,1)	(0.11,0.38,0.78)	(0.11,0.42,0.78)
تامین‌کننده ۱۲	(0.14,0.2,0.33)	(0.14,0.22,1)	(0.11,0.47,0.78)	(0.11,0.47,0.78)	(0.11,0.51,0.78)
تامین‌کننده ۱۳	(0.11,0.15,1)	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.29,0.78)	(0.11,0.42,0.78)	(0.11,0.38,0.78)
تامین‌کننده ۱۴	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.16,0.33)	(0.11,0.42,0.78)	(0.11,0.38,0.78)	(0.11,0.47,1)
تامین‌کننده ۱۵	(0.11,0.17,1)	(0.11,0.17,0.33)	(0.11,0.47,1)	(0.11,0.64,1)	(0.11,0.60,1)
تامین‌کننده ۱۶	(0.11,0.22,1)	(0.11,0.17,0.33)	(0.11,0.51,1)	(0.33,0.69,1)	(0.33,0.69,1)
تامین‌کننده ۱۷	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.38,0.78)	(0.11,0.47,0.78)	(0.11,0.47,0.78)
تامین‌کننده ۱۸	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.15,0.33)	(0.11,0.42,0.78)	(0.11,0.42,0.78)	(0.11,0.51,1)
تامین‌کننده ۱۹	(0.11,0.16,0.33)	(0.11,0.16,0.33)	(0.11,0.42,1)	(0.11,0.47,1)	(0.11,0.51,1)

در این مرحله، مقادیر α-*cuts* برای متغیرهای ورودی و خروجی، با استفاده از مقادیر فازی مثلثی ارایه‌شده در **جدول ۱۱**، محاسبه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از این محاسبات در **جدول ۱۲** درج گردیده است. این α-*cuts* امکان تحلیل عملکرد تامین‌کنندگان را در سطوح مختلف اطمینان فراهم می‌کنند و پایه‌ای برای ارزیابی کارایی در شرایط فازی محسوب می‌شوند.

در گام بعدی، کارایی هر یک از تامین‌کنندگان در سطوح مختلف α برآورد شد تا نحوه تغییرپذیری عملکرد آن‌ها در مواجهه با درجات مختلف عدم‌قطعیت موردبررسی قرار گیرد. **جدول ۱۳** شامل نمرات کارایی محاسبه‌شده برای هر سطح α است و نمایی از پویایی عملکرد تامین‌کنندگان در سطوح فازی مختلف ارایه می‌دهد.

بااین‌حال، برای دستیابی به یک رتبه‌بندی یکپارچه و نهایی از تامین‌کنندگان، لازم است که مقادیر کارایی فازی محاسبه‌شده در سطوح مختلف α با یکدیگر ترکیب شوند. در همین راستا، چن و کلاین [69] شاخصی ترکیبی را معرفی کرده‌اند که قابلیت تلفیق نتایج فازی را در قالب یک مقدار عددی نهایی فراهم می‌سازد. این شاخص که از طریق رابطه‌ای مشخص محاسبه می‌شود، مبنای مقایسه نهایی میان تامین‌کنندگان و تعیین رتبه‌بندی آن‌ها در محیط فازی خواهد بود.

$$I_j = \frac{\sum_{\propto=0}^{w}\left(\left(E_j\right)_{\propto_w}^{U} - min\{(E_{wj})^L\}\right)}{\left[\sum_{\propto=0}^{w}\left(\left(E_j\right)_{\propto_w}^{U} - min\{(E_{wj})^L\}\right) - \left(\sum_{\propto=0}^{w}\left(E_j\right)_{\propto_w}^{U} - min\{(E_{wj})^L\}\right)\right]}.$$

این روش امکان ایجاد یک دیدگاه یکپارچه از عملکرد تامین‌کنندگان را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب بهینه کمک می‌کند.

جدول ۱۲- α-cutsمربوط به متغیرهای ورودی و خروجی.

Table 12- α-cuts of input and output variables.

تامین‌کننده	قیمت	مصرف انرژی	کیفیت	بازیابی	سرعت تحویل
1	[0.11+0.09α, 1-0.8α]	[0.11 + 0.06α, 0.33–0.16α]	[0.33 + 0.23α, 0.78–0.22α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]	[0.11 + 0.31α,0.78-0.36]
2	[0.11+0.08α, 0.33-0.14α]	[0.11 + 0.09α, 1–0.8α]	[0.33 + 0.23α, 0.78–0.22α]	[0.11+0.36α, 0.78-0.31α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]
3	[0.11+0.08α, 0.33-0.14α]	[0.11 + 0.09α, 1–0.8α]	[0.33 + 0.31α, 1–0.36α]	[0.11 + 0.45α, 1–0.44α]	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]
4	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]	[0.11 + 0.09α, 1–0.8α]	[0.33 + 0.27α, 1–0.4α]	[0.11 + 0.45α, 1–0.44α]	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]
5	[0.11 + 0.08α, 0.33–0.14α]	[0.11 + 0.08α, 0.33–0.14α]	[0.33 + 0.36α, 1–0.31α]	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]
6	[0.11 + 0.06α, 0.33–0.16α]	[0.11 + 0.08α, 0.33–0.14α]	[0.11 + 0.4α, 1–0.49α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]
7	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.05α, 1–0.84α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]
8	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.05α, 1–0.84α]	[0.11 + 0.22α, 0.78–0.45α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]
9	[0.14 + 0.1α, 1–0.76α]	[0.11 + 0.05α, 1–0.84α]	[0.11 + 0.45α, 0.78–0.44α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]
10	[0.11 + 0.05α, 1–0.84α]	[0.11 + 0.06α, 0.33–0.16]	[0.11 + 0.36α, 1–0.53α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]
11	[0.11 + 0.08α, 1–0.81α]	[0.11 + 0.08α, 1–0.81α]	[0.11 + 0.36α, 1–0.53α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]
12	[0.14 + 0.06α, 0.33–0.13α]	[0.14 + 0.08α, 1–0.78α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]	[0.11 + 0.4α, 0.78–0.27α]
13	[0.11 + 0.04α, 1–0.85α]	[0.11 + 0.05α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.18α, 0.78–0.49α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]
14	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.05α, 0.33–0.17α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]	[0.11 + 0.36α, 1–0.53α]
15	[0.11 + 0.06α, 1–0.83α]	[0.11 + 0.06α, 0.33–0.16α]	[0.11 + 0.36α, 1–0.53α]	[0.11 + 0.53α, 1–0.36α]	[0.11 + 0.49α, 1–0.4α]
16	[0.11 + 0.11α, 1–0.78α]	[0.11 + 0.06α, 0.33–0.16α]	[0.11 + 0.4α, 1–0.49α]	[0.33 + 0.36α, 1–0.31α]	[0.33 + 0.36α, 1–0.31α]
17	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.27α, 0.78–0.4α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]	[0.11 + 0.36α, 0.78–0.31α]
18	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.04α, 0.33–0.18α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]	[0.11 + 0.31α, 0.78–0.36α]	[0.11 + 0.4α, 1–0.49α]
19	[0.11 + 0.05α, 0.33–0.17α]	[0.11 + 0.05α, 0.33–0.17α]	0.11 + 0.31α, 1–0.58α	[0.11 + 0.36α, 1–0.53α]	[0.11 + 0.4α, 1–0.49α]

جدول ۱۳- مقادیر کارایی در سطح‌های مختلف α-cuts.

Table 13- Efficiency scores at different α-cut levels.

رتبه	تامین‌کننده	α=0	α=0.25	α=0.5	α=0.75	α=1	Ij
1	5	[0.11,1]	[0.201,1]	[0.330,1]	[0.517,1]	[0.877,1]	0.6249
1	16	[0.11,1]	[0.196,1]	[0.324,1]	[0.502,1]	[0.840,1]	0.62
3	3	[0.11,1]	[0.195,1]	[0.314,1]	[0.485,1]	[0.813,0.991]	0.6153
4	10	[0.11,1]	[0.183,1]	[0.283,1]	[0.421,1]	[0.845,1]	0.61
5	4	[0.11,1]	[0.190,1]	[0.301,1]	[0.459,1]	[0.762,0.955]	0.6063
6	2	[0.11,1]	[0.190,1]	[0.301,1]	[0.459,1]	[0.762,0.918]	0.6045
7	15	[0.037,1]	[0.113,1]	[0.238,1]	[0.425,1]	[0.909,1]	0.6011
8	1	[0.11,1]	[0.188,1]	[0.283,1]	[0.421,1]	[0.682,0.947]	0.5958
9	18	[0.037,1]	[0.102,1]	[0.217,1]	[0.408,1]	[0.821,0.985]	0.5905
10	17	[0.037,1]	[0.102,1]	[0.217,1]	[0.408,1]	[0.821,0.985]	0.5894
11	19	[0.037,1]	[0.101,1]	[0.213,1]	[0.393,1]	[0.769,0.923]	0.5824
12	6	[0.037,1]	[0.103,1]	[0.209,1]	[0.379,1]	[0.724,1]	0.582
13	14	[0.037,1]	[0.097,1]	[0.203,1]	[0.378,1]	[0.756,0.942]	0.5804
14	12	[0.037,1]	[0.103,1]	[0.213,1]	[0.373,1]	[0.676,0.811]	0.5691
15	13	[0.037,1]	[0.089,1]	[0.175,1]	[0.309,1]	[0.676,0.744]	0.5578
16	9	[0.012,1]	[0.040,1]	[0.092,1]	[0.213,1]	[0.724,0.903]	0.5527
17	8	[0.037,1]	[0.083,1]	[0.154,1]	[0.274,1]	[0.531,0.692]	0.5416
18	11	[0.012,1]	[0.036,1]	[0.082,1]	[0.188,1]	[0.597,0.743]	0.5341
19	7	[0.037,1]	[0.078,1]	[0.140,1]	[0.244,1]	[0.467,613]	0.5302

مطابق داده‌های جدول، عملکرد هر یک از تامین‌کنندگان در پنج سطح مختلف (α از $\alpha=0$ تا $\alpha=1$) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای هر سطح α، بازه‌ای از مقادیر کارایی به‌صورت فازی در قالب $[L,U]$ گزارش شده که نمایانگر حد پایین و بالای کارایی در آن سطح از اطمینان است. با افزایش مقدار α که بیانگر حرکت از شرایط خوش‌بینانه به شرایط سخت‌گیرانه‌تر در تحلیل فازی است، گستره این بازه‌ها کاهش یافته و مقدار کارایی به یک مقدار عددی نزدیک‌تر و قطعی‌تر متمایل می‌شود. ستون آخر جدول نیز شاخصی ترکیبی و تجمیعی از نتایج فازی در تمام سطوح α ارایه می‌دهد که مبنای رتبه‌بندی نهایی تامین‌کنندگان قرار گرفته است.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تامین‌کنندگان شماره ۵ و ۱۶ بالاترین سطوح کارایی را در تمامی α-cuts تجربه کرده‌اند و به ترتیب رتبه‌های اول و دوم را به خود اختصاص داده‌اند. در سطح $\alpha=1$، بازه‌های کارایی آن‌ها به ترتیب [۰/۸۷۷، ۱] و [۰/۸۴۰، ۱] بوده است که نشان‌دهنده عملکرد بسیار مطلوب در شرایط قطعی است. شاخص‌های تجمیعی آن‌ها نیز به ترتیب برابر با ۰/۶۲۴۹ و ۰/۶۲ بوده که در مقایسه با سایر تامین‌کنندگان، در بالاترین سطح قرار دارد.

پس‌از این دو، تامین‌کنندگان شماره ۳ و ۱۰ با شاخص‌های نهایی ۰/۶۱۵۳ و ۰/۶۱ در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفته‌اند. نتایج مربوط به $\alpha=1$ برای این دو تامین‌کننده نیز حاکی از عملکرد بالا و بازه‌های فازی نسبتا گسترده و رقابتی هستند (به‌ترتیب [۰/۸۱۳، ۰/۹۹۱] و [۰/۸۴۵، ۱]).

تامین‌کنندگان شماره ۴ و ۲ نیز با امتیازات نهایی ۰/۶۰۶۳ و ۰/۶۰۴۵ در جایگاه‌های پنجم و ششم قرار گرفته‌اند. درحالی‌که عملکرد آن‌ها نسبت به گروه‌های برتر اندکی ضعیف‌تر است، اما همچنان در محدوده قابل‌قبول و رقابتی قرار دارند.

در بخش میانی رتبه‌بندی (رده‌های هفتم تا سیزدهم)، تامین‌کنندگان شماره ۱۵، ۱، ۱۸، ۱۷، ۱۹، ۶ و ۱۴ قرار دارند. این گروه در سطوح پایین‌تر α خصوصا ($\alpha=0$، $\alpha=0.25$) دارای بازه‌های فازی نسبتا وسیع‌تری بوده‌اند؛ بااین‌حال، در سطح $\alpha=1$ کارایی قطعی آن‌ها محدودتر و پایین‌تر از گروه‌های برتر بوده است.

در انتهای جدول (رتبه‌های چهاردهم به پایین)، تامین‌کنندگان شماره ۱۲، ۱۳، ۹، ۸، ۱۱ و ۷ مشاهده می‌شوند. این گروه در تمامی سطوحα ، مقادیر کارایی نسبتا پایین‌تری به ثبت رسانده‌اند. در این میان، تامین‌کننده شماره ۷ با شاخص تجمیعی ۰٫۵۳۰۲ پایین‌ترین رتبه را به خود اختصاص داده است.

مقایسه میان بازه‌های حاصل از $\alpha=0$ و $\alpha=1$ بیانگر آن است که در سطوح پایین α (نظیر $\alpha=0$)، بسیاری از تامین‌کنندگان به بازه‌ای حداکثر تا عدد ۱ دست یافته‌اند. این مساله حاکی از آن است که در شرایط خوش‌بینانه و با فرض بیشترین میزان عدم قطعیت، پتانسیل عملکردی بالایی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ اما با افزایش مقدار α و حرکت به‌سوی شرایط سخت‌گیرانه‌تر و واقع‌بینانه‌تر، بازه‌های عملکردی کاهش یافته و کارایی واقعی‌تر و محدودتری نمایان می‌گردد.

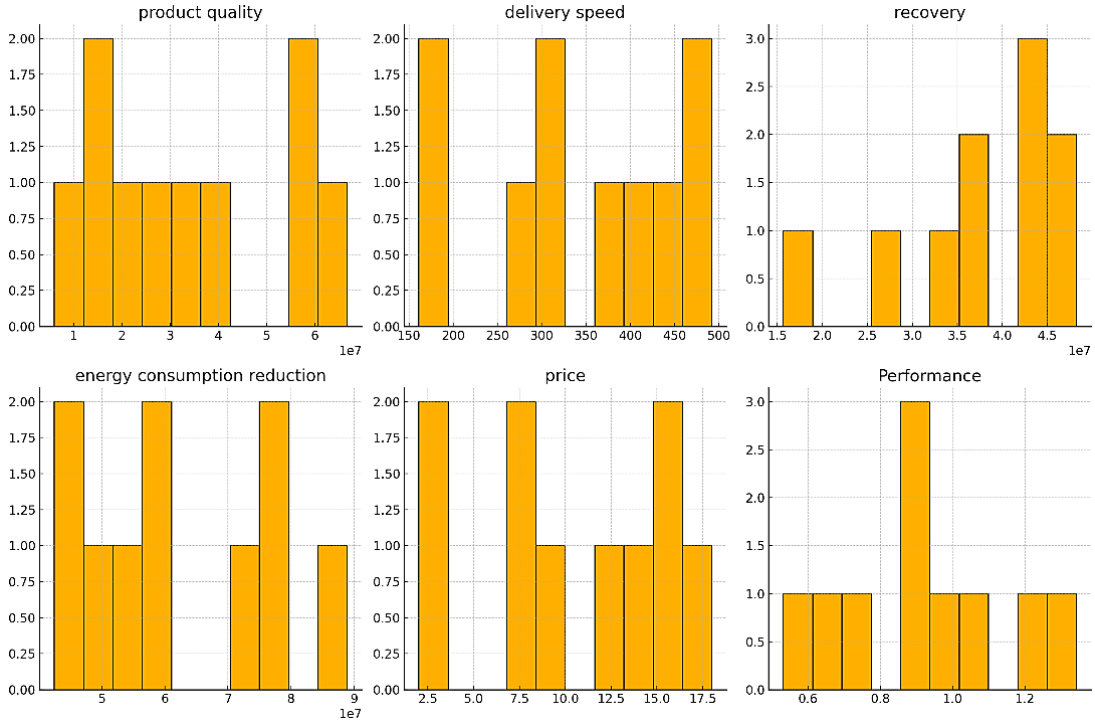
۳-۵- الگوریتم جنگل تصادفی

نصب و فراخوانی کتابخانه‌های موردنیاز

در این پژوهش، با هدف پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره گرفته شده است. در این راستا، فرآیند طراحی و پیاده‌سازی مدل رگرسیون جنگل تصادفی به‌صورت گام‌به‌گام تشریح می‌شود. در نخستین مرحله، کتابخانه‌های موردنیاز در محیط برنامه‌نویسی پایتون فراخوانی شده‌اند. به‌طور خاص، از کتابخانه *pandas* برای بارگذاری و مدیریت داده‌ها و از *matplotlib.pyplot* یا *seaborn* به‌منظور ترسیم نمودارهای بصری استفاده شده است.

در ادامه، داده‌های پژوهش از فایل *Data.xlsx* بارگذاری و پیش‌نمایشی از ساختار آن‌ها ارایه شده است. هدف از این مرحله، شناخت اولیه از مجموعه داده‌ها، شناسایی متغیرهای کلیدی، بررسی توزیع آن‌ها و تشخیص داده‌های پرت یا ناهنجار بوده است. به‌منظور ارزیابی توزیع آماری متغیرهای عددی، از هیستوگرام استفاده شده است. در این هیستوگرام‌ها، محور افقی مقادیر متغیر و محور عمودی میزان فراوانی آن‌ها را نمایش می‌دهد.

شکل ۲ نمودار توزیع متغیرهای اصلی را نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که برخی متغیرهای کلیدی مانند کیفیت محصولات، بازیابی و عملکرد کلی دارای توزیعی راست‌چوله هستند؛ درحالی‌که برخی دیگر، نظیر سرعت تحویل، توزیعی متمرکزتر در بازه‌ای محدود از مقادیر را از خود نشان می‌دهند. این تحلیل مقدماتی، بینشی اولیه نسبت به ویژگی‌های آماری داده‌ها ارایه می‌دهد و در تنظیم بهتر مدل و تفسیر نتایج پیش‌بینی در مراحل بعدی نقش بسزایی ایفا می‌کند.



شکل ۲- نمودار توزیع متغیرها.

Figure 2- Distribution of variables.

تفکیک ویژگی‌ها و متغیر هدف

در این مرحله از الگوریتم، هدف این است که داده‌ها به‌گونه‌ای تقسیم‌بندی شوند که ویژگی‌ها (*Features*) و متغیر هدف (*Target*) برای مدل‌سازی جنگل تصادفی مشخص شوند. در اینجا، متغیر هدف *Performance* درنظر گرفته شده است که باید پیش‌بینی شود. در این راستا، *x* حاوی تمامی ستون‌ها به‌جز ستون *Performance* است. به‌عبارت‌دیگر، تمام ویژگی‌های موجود در داده‌ها (*supplier,price, energy consumption,…*) به‌عنوان ورودی‌های مدل درنظر گرفته می‌شوند. از سو یی دیگر، *y* تنها شامل ستون *Performance* است که متغیر هدف برای پیش‌بینی است. این متغیر به‌صورت یک سری شامل مقادیر پیوسته (عدد حقیقی) خواهد بود که باید مدل جنگل تصادفی آن را پیش‌بینی کند. این گام یکی از مراحل کلیدی در آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی است که می‌تواند تاثیر زیادی بر دقت مدل داشته باشد.

تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون

در این گام، هدف این است که داده‌ها به دو مجموعه‌ی آموزش و آزمون تقسیم شوند تا مدل به‌طور موثر آموزش ببیند و عملکرد آن ارزیابی شود. در الگوریتم‌های یادگیری ماشین، این تقسیم‌بندی به این صورت است که داده‌های آموزش برای آموزش مدل استفاده می‌شوند و داده‌های آزمون برای ارزیابی دقت مدل پس از آموزش به‌کار می‌روند. هدف از تقسیم داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمون این است که بتوانیم مدل را ابتدا روی مجموعه آموزش دهیم و سپس روی داده‌های آزمون که قبلا مدل آن‌ها را ندیده است، ارزیابی کنیم. این کار به ارزیابی عملکرد مدل کمک می‌کند و از *Overfitting* (یادگیری بیش‌ازحد مدل از داده‌های آموزش) جلوگیری می‌کند. در اینجا، از تقسیم تصادفی استفاده شده است که با استفاده از *random_state* تضمین می‌شود که تقسیم‌بندی داده‌ها در هر بار اجرا یکسان باشد. این کار باعث می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی بازتولیدپذیر باشند. همچنین، مقدار *test_size=0.2* به این معنی است که ۲۰% از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آزمون درنظر گرفته می‌شود. این نسبت معمولا رایج است، اما بسته به حجم داده‌ها و نیاز مدل، می‌توان این مقدار را تغییر داد.

ساخت مدل جنگل تصادفی و آموزش آن

در این مرحله، یک مدل جنگل تصادفی ایجاد می‌شود. سپس این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی متغیر هدف (*Performance*) با استفاده از ویژگی‌های ورودی (*X_train*) آموزش داده شود. به بیانی دیگر، در این مرحله، تنها یک مدل از نوع جنگل تصادفی ایجاد می‌شود و به‌طور خاص هیچ خروجی‌ای از خود نخواهد داشت. این مدل آماده است که در مراحل بعدی آموزش داده شود و از آن برای پیش‌بینی استفاده شود.

تنظیم هایپر پارامترها

در این مرحله، هدف این است که بهترین تنظیمات مدل (هایپرپارامترها) برای مدل جنگل تصادفی پیدا شود. این فرآیند از *GridSearchCV* استفاده می‌کند که به‌طور خودکار بهترین ترکیب از هایپرپارامترها را با استفاده از *cross-validation* جستجو می‌کند. این روش باعث می‌شود که مدل با بهترین تنظیمات آموزش داده شود و احتمال دقت بالاتری داشته باشد. تنظیم هایپرپارامترها در چند گام انجام می‌شود که به شرح زیر است:

۱. تعریف فضای جستجوی پارامترها: در این مرحله، یک پارامتر گرید (*parameter grid*) برای جستجو تنظیم می‌شود. این گرید حاوی مقادیر مختلف برای هر یک از هایپرپارامترهای مدل جنگل تصادفی است که باید مورد آزمایش قرار گیرند.
۲. تنظیم *Gridsearchcv* برای جستجوی بهترین پارامترها: در این بخش از کد، *GridSearchCV* برای جستجوی بهترین ترکیب از پارامترها بر اساس معیار ارزیابی مشخص می‌شود.
۳. اجرای جستجو با استفاده از *GridsearchCV*: در این گام، فرآیند جستجوی ترکیب‌های مختلف پارامترها شروع می‌شود و مدل روی داده‌های آموزشی *X_train* و *y_train* آموزش داده می‌شود.
۴. مشخص شدن بهترین پارامترها و امتیاز متقابل (*Cross-Validation Score*): پس از اتمام فرآیند جستجو، بهترین پارامترها و بهترین امتیاز *cross-validation* مشخص می‌گردد.

در این راستا

۱. *Best Parameters*: این خط نشان می‌دهد که بهترین تنظیمات پارامترها برای مدل جنگل تصادفی شامل مقادیر زیر است:

- *bootstrap=True*: از نمونه‌برداری *bootstrap* استفاده خواهد شد.

- *max_depth=None*: عمق هر درخت نامحدود است.

- *min_samples_leaf=2*: حداقل ۲ نمونه در هر برگ وجود دارد.

- *min_samples_split=5*: حداقل ۵ نمونه برای تقسیم هر گره داخلی لازم است.

- *n_estimators=100*: مدل شامل ۱۰۰ درخت تصمیم است.

۲. *Best Cross-Validation Score*: این مقدار نشان‌دهنده بهترین امتیاز حاصل از *cross-validation* است. این امتیاز معیاری برای ارزیابی مدل است و خطای میانگین مربعات[1] منفی است. مقدار منفی به خاطر استفاده از *MSE* منفی برای جستجو است. در اینجا، بهترین امتیاز ۰/۰۴۶۰- است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است (هرچه مقدار *MSE* کمتر باشد، مدل بهتر است).

[1] Mean Squared Error (MSE)

ارزیابی مدل

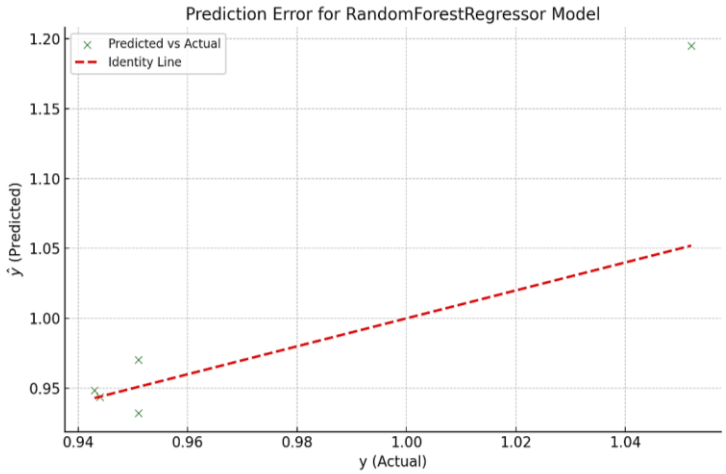
در این مرحله، عملکرد مدل با پیش‌بینی مقادیر *Performance* در داده‌های آزمون و مقایسه آن با مقادیر واقعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معیارهای ارزیابی شامل موارد زیر است:

۱. میانگین قدر مطلق خطا (*MAE*): این معیار میانگین خطای مطلق پیش‌بینی‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه مقدار کمتری باشد، مدل بهتری است. در این مدل، میانگین قدر مطلق خطا برابر با ۰٫۱۳۴۰ که نشان‌دهنده این است که مدل دقت خوبی را دارد.
۲. جذر میانگین مربعات خطا (*MSE*): این مقدار نشان‌دهنده میانگین مربع خطاها بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده است. مقدار پایین به این معناست که مدل توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی انجام دهد. در این مدل؛ مقدار جذر میانگین مربعات خطاها برابر با ۰٫۰۲۰۸ است که مقدار نسبتا کم و مطلوبی برای مدل محسوب می‌شود.

از سو یی دیگر، در ادامه نمودار مقایسه پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی در **شکل ۳** ارایه شده است نمودار مقایسه پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل تا چه حد با مقادیر واقعی انطباق دارند. هرچه نقاط نزدیک‌تر به خط قرمز (خط ایده‌آل) باشند، مدل بهتر عمل کرده است. اگر نقاط به‌طور پراکنده در اطراف خط قرمز قرار داشته باشند، نشان‌دهنده‌ی مدل کمتر دقیق است. از سوی دیگر، نمودار باقی‌مانده‌ها برای تحلیل کیفیت مدل مفید است. اگر مدل خوب باشد، باقی‌مانده‌ها باید به‌صورت تصادفی پراکنده باشند و هیچ الگوی خاصی در آن‌ها دیده نشود. اگر الگوهایی در باقی‌مانده‌ها وجود داشته باشد، به این معناست که مدل نتوانسته است برخی ویژگی‌های داده‌ها را شبیه‌سازی کند.

در این راستا همان‌طور که در نمودار پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی نشان داده شده است، در این نمودار، مقادیر واقعی (*y_actual*) روی محور افقی و مقادیر پیش‌بینی‌شده (*y_predicted*) روی محور عمودی نشان داده شده‌اند. همچنین خط قرمز یک خط ایده‌آل است که مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی را کاملا یکسان فرض می‌کند. هر چه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. نقاط سبز فاصله بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده یا به بیانی دیگر، پیش‌بینی‌های مدل را در مقایسه با مقادیر واقعی نشان می‌دهند. در این نمودار، اکثر نقاط فاصله کمی دارند که نشان‌دهنده آن است که مدل دقت بالایی در پیش‌بینی متغیر هدف داشته است.

شایان‌ذکر است که محور افقی مقادیر واقعی متغیر هدف (*Performance*) در محدوده ۰٫۹۴ تا ۱٫۰۴ قرار دارند. همچنین محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل نیز در محدوده ۰٫۹۵ تا ۱٫۲۰ قرار دارند. مطابق شکل مدل توانسته است مقادیر پیش‌بینی‌شده را در بازه مشابه مقادیر واقعی نگه دارد، اما در برخی موارد مقادیر پیش‌بینی‌شده کمی بالاتر از مقادیر واقعی هستند؛ که این موضوع ممکن است نشان‌دهنده سوگیری مثبت مدل باشد، به این معنا که مدل در برخی موارد عملکرد را بهتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است.

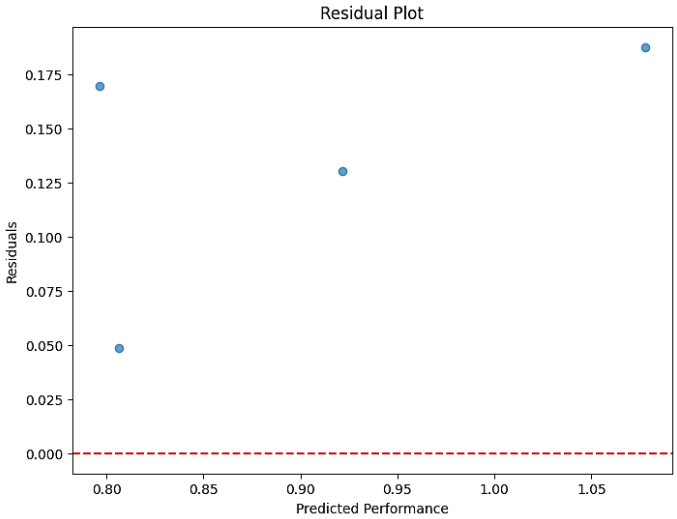


شکل ۳- خطای پیس بینی برای مدل رگرسیون جنگل تصادفی.
Figure 3- Prediction error for the random forest regression model.

همچنین **شکل ۴** که مربوط به باقیمانده‌ها (*Residuals*) در مدل جنگل تصادفی است در راستای پیش‌بینی و ارزیابی خطاهای مدل، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، مدل پیش‌بینی‌های خود را با مقادیر واقعی مقایسه کرده و باقیمانده‌ها (*Residuals*) را محاسبه می‌کند. باقیمانده‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$predict\ Y - actualY = Residental.$$

این نمودار کمک می‌کند تا توزیع خطاهای مدل (باقیمانده‌ها) و رفتار آن‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی‌شده تحلیل شود. در شکل محور افقی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل (*y_predicted*) را نمایش می‌دهد. مقادیر پیش‌بینی‌شده بین ۰٫۹۵ تا ۱٫۲۰ قرار دارند. همچنین محور عمودی مقدار باقیمانده‌ها را نمایش می‌دهد. مقادیر باقیمانده در این نمودار بین ۰٫۰۲ و ۰٫۱۴- متغیر هستند. خط قرمز (*Residual=0*) نشان‌دهنده وضعیتی است که در آن مدل به‌طور دقیق پیش‌بینی کرده و خطایی وجود ندارد. هر چه نقاط نزدیک‌تر به این خط باشند، مدل خطای کمتری دارد. همچنین نقاط آبی (*Residual*) نشان‌دهنده یک نمونه است. فاصله این نقاط از خط قرمز نشان‌دهنده مقدار خطای مدل در پیش‌بینی آن نمونه است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، باقیمانده‌ها به‌طورکلی نزدیک به خط قرمز قرار دارند که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است. همچنین توزیع باقیمانده‌ها تصادفی به نظر می‌رسد و الگوی خاصی ندارد. این موضوع نشان‌دهنده این است که مدل توانسته است روابط موجود در داده‌ها را به‌خوبی یاد بگیرد. شایان‌ذکر است که نبود الگوهای مشخص (مثل خطوط منحنی یا خطی) در نمودار باقیمانده‌ها بیانگر این است که مدل دچار مشکلاتی مانند بیش‌برازش (*Overfitting*) یا کم‌برازش (*Underfitting*) نشده است. به‌صورت کلی، مدل جنگل تصادفی عملکرد قابل قبولی داشته و خطاهای پیش‌بینی در محدوده قابل‌قبولی قرار دارند.



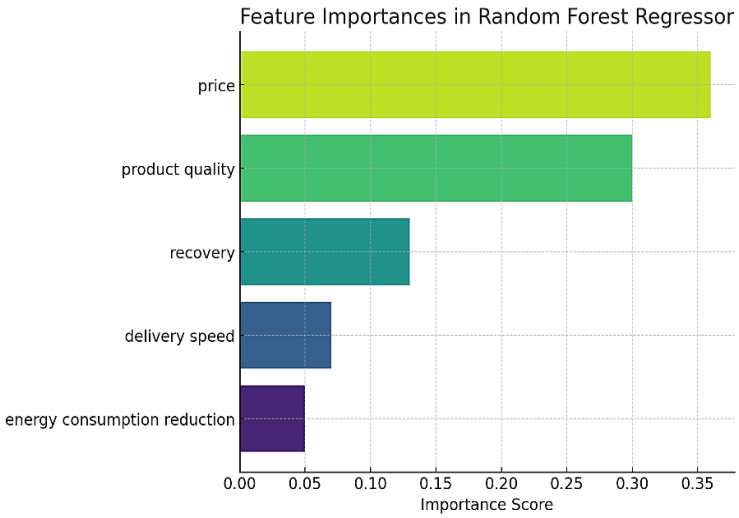
شکل ۴- باقی‌مانده‌ها برای مدل رگرسیون جنگل تصادفی.

Figure 4- Residuals for the random forest regression model.

تحلیل اهمیت ویژگی‌ها

نمودار اهمیت ویژگی‌ها که در **شکل ۵** ارایه شده است، نشان‌دهنده تاثیر هر یک از ویژگی‌های ورودی بر پیش‌بینی نهایی مدل است. در این نمودار، مقادیر بیشتری که برای هر ویژگی اختصاص داده شده است، نشان‌دهنده اهمیت بالاتر آن ویژگی در پیش‌بینی نتایج مدل است. از نظر مدل جنگل تصادفی، قیمت (*price*) و کیفیت محصولات (*product quality*) از مهم‌ترین ویژگی‌ها به‌شمار می‌آیند؛ این دو ویژگی بیشترین تاثیر را در پیش‌بینی عملکرد مدل دارند. به‌عنوان‌مثال، ویژگی قیمت با مقدار حدود ۰/۳۵ نشان می‌دهد که این ویژگی نقش بسیار عمده‌ای در پیش‌بینی عملکرد مدل دارد و ویژگی کیفیت محصولات با مقدار حدود ۰/۳ بیانگر اهمیت بالای کیفیت در تعیین عملکرد مدل است. در مقابل، برخی ویژگی‌ها از اهمیت کمتری برخوردارند؛ به‌عنوان نمونه، ویژگی‌هایی مانند بازیابی (*recovery*) با مقدار نزدیک به ۰/۱۰، تاثیر کمتری در پیش‌بینی نهایی مدل دارند.

همچنین، ویژگی‌هایی مانند سرعت تحویل[1] و کاهش مصرف انرژی[2] که مقادیر آن‌ها نزدیک به ۰/۰۵ یا کمتر است، نقش اندکی در پیش‌بینی خروجی نهایی مدل ایفا می‌کنند.



شکل ۵- اهمیت ویژگی‌ها در مدل رگرسیون جنگل تصادفی.

Figure 5- Feature importance in the random forest regression model.

۶- بررسی کارایی و عملکرد مدل تصمیم‌گیری توسعه داده شده

در این بخش، کارایی و عملکرد مدل تصمیم‌گیری مورداستفاده با توجه به معیارهای تعریف‌شده و مقایسه با سایر روش‌ها ارزیابی شده است. شایان‌ذکر است که نتایج حاصل به مطالعه موردی این تحقیق محدود بوده و ممکن است در شرایط متفاوت، نتایج مشابهی به دست نیاید.

۱-۶- مقایسه مدل با و بدون درنظر گرفتن بعد فرهنگی

به‌منظور اثبات تاثیر معنی‌دار بعد فرهنگی در انتخاب تامین‌کنندگان، از آزمون آماری t جفتی استفاده گردید. آزمون *t* جفتی برای مقایسه دو مجموعه داده وابسته استفاده می‌شود. در اینجا، دو مدل داریم که تامین‌کنندگان را بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی می‌کنند:

۱. مدل پایه (بدون درنظر گرفتن بعد فرهنگی): رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با استفاده از معیارهای سنتی زنجیره‌تامین لارج.
۲. مدل اصلاح‌شده (با درنظر گرفتن بعد فرهنگی): رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با در نظر گرفتن بعد فرهنگی در زنجیره‌تامین لارج.

در این راستا، ابتدا معیارهای مساله تحقیق بدون درنظر گرفتن بعد فرهنگی شناسایی شده و با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی وزن معیارها محاسبه گردید.

در گام بعد، به ارزیابی تامین کنندگان با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های فازی پرداخته شد. نحوه انجام آزمون *t* جفتی به‌صورت گام‌به‌گام در فایل پیوست ارایه شده است و در **جدول ۱۴** نتایج حاصل از این دو مدل مقایسه شدند. چون مقدار *p-value* کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت بین دو مدل (مدل با و بدون درنظر گرفتن بعد فرهنگی) از نظر آماری معنادار است و اضافه کردن بعد فرهنگی به مدل باعث بهبود معناداری در انتخاب تامین‌کنندگان شده است و تفاوت‌های مشاهده‌شده به‌طور تصادفی به وجود نیامده‌اند. این آزمون نشان می‌دهد که بعد فرهنگی تاثیر مثبتی بر رتبه‌بندی تامین‌کنندگان داشته و این تفاوت‌ها از نظر آماری معنادار هستند.

[1] delivery time

[2] Energy consumption reduction

جدول ۱۴- مقایسه خروجی دو مدل.
Table 14- Comparison of the results of two models.

تامین‌کننده	امتیاز کارایی در مدل با بعد فرهنگی	امتیاز کارایی در مدل بدون بعد فرهنگی	تفاوت
تامین‌کننده ۱	0.595	0.563	0.032
تامین‌کننده ۲	0.604	0.581	0.023
تامین‌کننده ۳	0.615	0.598	0.017
تامین‌کننده ۴	0.606	0.58	0.026
تامین‌کننده ۵	0.625	0.613	0.012
تامین‌کننده ۶	0.582	0.567	0.015
تامین‌کننده ۷	0.53	0.48	0.05
تامین‌کننده ۸	0.5416	0.562	-0.0204
تامین‌کننده ۹	0.553	0.518	0.035
تامین‌کننده ۱۰	0.61	0.64	-0.03
تامین‌کننده ۱۱	0.535	0.515	0.02
تامین‌کننده ۱۲	0.569	0.54	0.029
تامین‌کننده ۱۳	0.557	0.583	-0.026
تامین‌کننده ۱۴	0.58	0.562	0.018
تامین‌کننده ۱۵	0.601	0.574	0.027
تامین‌کننده ۱۶	0.62	0.599	0.021
تامین‌کننده ۱۷	0.589	0.561	0.028
تامین‌کننده ۱۸	0.59	0.574	0.016
تامین‌کننده ۱۹	0.5824	0.55	0.0324

۲-۶- بررسی عملکرد روش بهترین-بدترین فازی

در این بخش، روش بهترین-بدترین تصادفی با استفاده از دو معیار اصلی، یعنی نرخ ناسازگاری (*CR*) و میزان انحراف کل (*TD*) با روش‌های سنتی شامل روش بهترین-بدترین سنتی (*TBWM*) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[1] مقایسه شده است. در ادامه توضیحات بیشتری درباره این دو معیار در فایل پیوست ارایه شده است. در این راستا، **جدول ۱۵** به مقایسه روش‌های *FBWM*، *TBWM* و *AHP* از منظر معیارهای نرخ ناسازگاری و انحراف کل می‌پردازد لازم به ذکر است که در این جدول، میانگین به‌عنوان متوسط مقدار معیار محاسبه‌شده برای تمامی مقایسه‌ها در نظر گرفته شده است. مطابق اطلاعات ارایه‌شده در جدول، روش بهترین-بدترین فازی از منظر نرخ ناسازگاری در مقایسه با روش *AHP* عملکرد بهتری داشته است. بااین‌حال، نرخ ناسازگاری روش بهترین بدترین سنتی اندکی از روش بهترین-بدترین فازی بهتر است که این تفاوت را می‌توان به ویژگی قطعی بودن روش سنتی و عدم لحاظ نوسانات فضای تصمیم‌گیری نسبت داد. از سوی دیگر، در معیار انحراف کل، روش بهترین-بدترین فازی بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان داده است. این یافته‌ها بر برتری و کارایی روش بهترین-بدترین فازی دلالت دارند.

جدول ۱۵- مقایسه روش بهترین-بدترین فازی با روش‌های سنتی از نظر معیارهای CR و TD.
Table 15- Comparison of the FBWM with traditional methods based on CR and TD criteria.

	FBWM		TBWM		AHP	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
CR	0.0456234	0.01659	0.043872	0.01509	0.0793824	0.02568
TD	1.5086	0.3867	1.6329	0.5251	2.1044	0.8135

[1] Analytical Hierarchy Process (AHP)

۶-۳- بررسی عملکرد روش تحلیل پوششی داده‌های فازی

در این بخش، به‌منظور بررسی صحت و تایید کارایی روش تحلیل پوششی داده‌های فازی در ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان، نتایج حاصل از این روش با نتایج به‌دست‌آمده از روش تاپسیس فازی مقایسه شده است. هدف از این مقایسه، تحلیل میزان شباهت یا تفاوت نتایج این دو روش است.

برای این منظور، مقادیر کارایی ۱۹ تامین‌کننده که با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های فازی محاسبه شده‌اند، در کنار مقادیر به‌دست‌آمده از روش تاپسیس فازی در **جدول ۱۶** ارایه شده و تحلیل تطبیقی صورت گرفته است. شاخص‌هایی مانند رتبه‌بندی نهایی تامین‌کنندگان و انحراف مقادیر کارایی میان دو روش به‌عنوان مبنای مقایسه درنظر گرفته شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که رتبه‌بندی نهایی تامین‌کنندگان در هر دو روش تا حد زیادی مشابه است. هرچند در برخی موارد، تفاوت‌های جزیی در مقادیر کارایی مشاهده می‌شود، اما این تفاوت‌ها قابل توجیه بوده و ناشی از تفاوت در منطق محاسباتی و مدل‌سازی دو روش است. از مقایسه نتایج مشخص می‌شود که روش تحلیل پوششی داده‌های فازی از قابلیت بالایی در ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان برخوردار است و نتایج حاصل از این روش در مقایسه با روش تاپسیس فازی از اعتبار کافی برخوردار هستند. به‌طور خاص، نزدیکی نسبی نتایج حاصل از دو روش نشان‌دهنده تطابق منطقی ارزیابی‌ها و تایید کارایی روش تحلیل پوششی داده‌های فازی در این مطالعه است.

جدول ۱۶- مقایسه نتایج تاپسیس فازی و تحلیل پوششی فازی.
Table 16- Comparison of fuzzy TOPSIS and fuzzy dea results.

تامین‌کننده	کارایی FDEA	رتبه FDEA	کارایی FTOPSIS	رتبه FTOPSIS	اختلاف رتبه
1	0.595	8	0.58	8	0
2	0.604	6	0.598	7	1
3	0.615	3	0.605	3	0
4	0.606	5	0.61	5	0
5	0.625	2	0.62	2	0
6	0.582	12	0.57	12	0
7	0.53	19	0.52	19	0
8	0.5416	17	0.535	16	1
9	0.553	16	0.545	15	1
10	0.61	4	0.6	4	0
11	0.535	18	0.53	17	1
12	0.569	14	0.56	14	0
13	0.557	15	0.55	13	2
14	0.58	13	0.575	11	2
15	0.601	7	0.595	7	0
16	0.62	1	0.61	1	0
17	0.589	10	0.58	9	1
18	0.59	9	0.585	10	1
19	0.5824	11	0.57	11	0

۶-۴- تحلیل حساسیت وزن‌ها

یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی پایداری و اعتبار مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات وزن معیارها می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، چنانچه اعمال تغییرات جزیی در وزن یک یا چند معیار منجر به تغییرات قابل‌توجه در رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل نسبت به نوسانات ورودی‌ها از پایداری لازم برخوردار نیست. ازاین‌رو، در این بخش به تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییر وزن معیارها پرداخته شده است. برای این منظور، چهار معیار کلیدی که در مرحله وزن‌دهی به روش بهترین-بدترین فازی دارای بالاترین

اهمیت نهایی بودند، شامل قیمت (۰٫۰۵۵)، کیفیت محصول (۰٫۰۵۳۹)، بازیابی (۰/۰۵۳۵) و مصرف انرژی (۰/۰۵۷۹) انتخاب شدند. در ادامه، تاثیر تغییر وزن هر یک از این معیارها در دو حالت افزایشی و کاهشی (به میزان ±۱۰%) بر رتبه‌بندی تامین‌کنندگان بررسی گردید.

در فرآیند تحلیل، ابتدا در هر سناریو تنها وزن یک معیار به میزان تعیین‌شده تغییر داده شد و سپس به‌منظور حفظ ثبات مجموع اوزان، سایر معیارها متناسب با تغییر ایجادشده بازنرمال‌سازی شدند. در گام بعد، مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی با استفاده از داده‌های جدید اجرا شد و رتبه‌بندی جدید تامین‌کنندگان استخراج گردید. درنهایت، رتبه نهایی هر تامین‌کننده در شرایط جدید با وضعیت اولیه مقایسه شده و میزان جابه‌جایی رتبه‌ها گزارش گردید. این تحلیل امکان ارزیابی میزان پایداری مدل را در برابر تغییرات کارشناسی یا عدم‌قطعیت در وزن‌دهی فراهم می‌سازد و از منظر عملیاتی، ابزاری موثر برای اطمینان از قابلیت اعتماد مدل در شرایط واقعی تصمیم‌گیری فراهم می‌کند.

جدول ۱۷- تحلیل حساسیت وزن معیارهای کلیدی.
Table 17- Key criteria weight sensitivity analysis.

معیار تغییریافته	نوع تغییر	بیشترین جابجایی رتبه	میانگین جابجایی رتبه	تامین‌کنندگان تحت تاثیر
قیمت	+10%	2	0.89	13,19,7
قیمت	-10%	2	0.78	11,5,2
کیفیت	+10%	3	1.1	17,14,6
کیفیت	-10%	2	0.93	10,8,1
بازیابی	+10%	2	0.71	15,3
بازیابی	-10%	1	0.44	18,12
مصرف انرژی	+10%	1	0.52	16,4
مصرف انرژی	-10%	1	0.38	13,5

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

تحقیق حاضر با توسعه مدلی داده‌محور، گامی موثر در ارزیابی تامین‌کنندگان در زنجیره‌تامین لارج (شامل ابعاد ناب، چابک، تاب‌آور و سبز) با تاکید بر بعد فرهنگی برداشته است. این مدل ترکیبی از روش‌های بهترین بدترین فازی، تحلیل پوششی داده‌های فازی و الگوریتم یادگیری ماشین بوده و در قالب سه مرحله طراحی و اجرا شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی، معیارهای کلیدی برای ارزیابی تامین‌کنندگان شناسایی شدند. نتایج نشان داد که معیار تاب‌آوری با وزن ۰/۲۵۹۳ بیشترین اهمیت را در زنجیره‌تامین لارج دارد. زیرمعیارهای مدیریت ریسک و بازیابی در این دسته، نقش محوری دارند. معیارهای چابکی و سبز بودن نیز از اولویت بالایی برخوردارند. زیرمعیارهای مصرف انرژی، کاهش گازهای گلخانه‌ای و انعطاف‌پذیری در تولید به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیارها در این بخش‌ها شناسایی شدند. معیار ناب بودن با زیرمعیارهایی چون کیفیت محصول و زمان تحویل نیز نقش مهمی در ارزیابی تامین‌کنندگان ایفا کرد. این شناسایی‌ها به مدیران کمک می‌کند تا تمرکز خود را بر عوامل کلیدی برای بهبود عملکرد تامین‌کنندگان معطوف کنند. برای ارزیابی کارایی تامین‌کنندگان، مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی به‌کار گرفته شد. در این مدل، متغیرهای ورودی (مانند هزینه و مصرف انرژی) و متغیرهای خروجی (مانند بازیابی، کیفیت محصول و سرعت تحویل) تعریف شدند.

تحلیل فازی امکان مدیریت عدم قطعیت و ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان در شرایط خوش‌بینانه تا بدبینانه را فراهم کرد. در مرحله سوم پژوهش، الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان به کار گرفته شد. داده‌های تاریخی جمع‌آوری و پردازش شدند. سپس مدل با استفاده از داده‌های آموزشی آموزش دید و با داده‌های آزمون ارزیابی شد. نتایج پیش‌بینی نشان داد که مدل توانسته است مقادیر پیش‌بینی‌شده را در بازه‌ای نزدیک به مقادیر واقعی نگه دارد. این پیش‌بینی‌ها به مدیران امکان می‌دهد تا بر اساس عملکرد آینده تامین‌کنندگان، تصمیمات استراتژیک موثرتری اتخاذ کنند و از ریسک‌های احتمالی جلوگیری کنند. شایان‌ذکر است که نتایج آماری حاصل از آزمون t جفتی نشان می‌دهد که واردکردن بعد فرهنگی به مدل انتخاب تامین‌کننده، به‌صورت معناداری عملکرد مدل را بهبود داده است. این یافته تاکید می‌کند که ابعاد "درک فرهنگ"، "ارتباطات موثر" و "انعطاف‌پذیری فرهنگی" در ارتقای هماهنگی، کاهش تعارضات و بهبود تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در زنجیره‌تامین نقش مهم و قابل‌توجهی دارند؛ بنابراین، توجه به بعد فرهنگی در مدیریت تامین‌کنندگان به‌عنوان یک عامل کلیدی موفقیت در زنجیره‌های تامین پیچیده و

چندفرهنگی مطرح می‌گردد و مدل ارایه‌شده در این پژوهش با تمرکز بر ابعاد عملیاتی و قابل‌سنجش فرهنگ، گامی موثر در توسعه دانش مدیریت زنجیره‌تامین برداشته است. مدل پیشنهادی این پژوهش با استفاده از معیارهای چندبعدی (ناب، چابک، تاب‌آور، سبز و فرهنگی) می‌تواند در قالب الگوریتم‌ها و قواعد تصمیم‌گیری در سیستم‌های برنامه‌ریزی منابع سازمانی و نرم‌افزارهای اختصاصی مدیریت زنجیره‌تامین پیاده‌سازی شود. در این راستا، پیشنهاد می‌شود:

۱. مدیران زنجیره‌تامین از مدل ارایه‌شده برای تعیین وزن نسبی معیارهای ارزیابی و رتبه‌بندی تامین‌کنندگان در نرم‌افزارهای *ERP* استفاده نمایند. این رویکرد، ابعاد فرهنگی و اجتماعی را به‌طور نظام‌مند در تصمیمات مدیریتی لحاظ کرده و موجب افزایش دقت و اثربخشی انتخاب تامین‌کنندگان خواهد شد.
۲. ابعاد فرهنگی به شکل ماژول‌های نرم‌افزاری در سیستم‌های *ERP* پیاده‌سازی گردد تا امکان تحلیل خودکار و مستمر شاخص‌های فرهنگی مانند "درک فرهنگ"، "ارتباطات موثر" و "انعطاف‌پذیری فرهنگی" فراهم شود. این شاخص‌ها به‌عنوان بخشی از بانک اطلاعاتی تامین‌کنندگان ذخیره و به‌طور دوره‌ای مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرند.
۳. جهت عملیاتی‌سازی مدل پیشنهادی، رابط‌های برنامه‌نویسی کاربردی (*API*) برای انتقال داده‌ها و نتایج ارزیابی بین سیستم‌های *ERP* و نرم‌افزارهای تحلیلی (مانند تحلیل پوششی داده‌های فازی و الگوریتم جنگل تصادفی) طراحی گردد. این فرآیند می‌تواند به‌صورت ماژولار در سیستم‌های *ERP* و از طریق سرویس‌های ابری پیاده‌سازی شود.
۴. داشبوردهای مدیریتی جهت نمایش نتایج و تحلیل‌های مدل برای مدیران و سیاست‌گذاران طراحی و پیاده‌سازی گردد. این داشبوردها با ارایه بصری اطلاعات و تحلیل‌های فوری، تصمیم‌گیری سریع و دقیق‌تر مدیران را تسهیل می‌کنند.

همچنین، برای توسعه بیشتر پژوهش در آینده پیشنهاد می‌شود:

۱. انجام مطالعات مشابه در صنایع دیگر (مانند صنایع غذایی، پتروشیمی و لوازم‌خانگی) جهت بررسی قابلیت تعمیم مدل و ارتقا جامعیت آن
۲. ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مختلف (مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی یا کوپراس فازی) و روش‌های فرابتکاری برای بهینه‌سازی وزن معیارها و مقایسه نتایج
۳. جمع‌آوری و تحلیل داده‌های طولی برای بررسی دقیق‌تر تغییرات کارایی تامین‌کنندگان در بازه‌های زمانی طولانی‌تر
۴. بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به‌منظور بهبود دقت در پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان
۵. بررسی عمیق‌تر ابعاد فرهنگی و اجتماعی در سطوح خرد زنجیره‌تامین (مانند تعاملات فردی و مدیریت تعارضات فرهنگی)
۶. بررسی هم‌افزایی میان روش‌های مختلف تحلیلی مانند تحلیل عاملی تاییدی، خوشه‌بندی و سایر تکنیک‌های داده‌کاوی به‌منظور ارتقای دقت و انعطاف‌پذیری مدل

این پیشنهادها می‌توانند زمینه‌ساز تحقیقات جامع‌تر و کاربردی‌تر در آینده باشند.

مشارکت نویسندگان

کلیه نویسندگان در تمامی مراحل این پژوهش، از طراحی و اجرای مطالعه تا تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله، مشارکتی فعال داشته‌اند. نسخه نهایی مقاله نیز توسط تمامی نویسندگان مطالعه و تایید شده است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در ارتباط با این پژوهش هیچ‌گونه تضاد منافع مالی، سازمانی یا شخصی وجود ندارد. کلیه نتایج به‌صورت مستقل و با رعایت اصول بی‌طرفی علمی گزارش شده‌اند.

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هیچ‌گونه حمایت مالی از نهادها، سازمان‌ها یا موسسات بیرونی انجام شده و تمامی هزینه‌ها توسط پژوهشگران به‌صورت شخصی تامین گردیده است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش مبتنی بر اطلاعات واقعی استخراج‌شده از سامانه‌های مرتبط با صنعت خودرو بوده و در صورت ارایه درخواست موجه از سوی پژوهشگران دیگر، امکان دسترسی به داده‌ها از طریق نو یسنده مسئول فراهم خواهد بود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در اجرای این پژوهش همکاری داشته‌اند، به‌ویژه کارشناسان محترم شرکت سایپا و داوران گرامی نشریه که با ارایه نظرات اصلاحی و سازنده، موجب ارتقای کیفیت مقاله شدند، صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

[1] Zeidi, H., Fathi, M. R., & Pishadar, M. (2025). The causal model of circular supply chain in the petrochemical industry of Iran with the FDelphi-FDEMATEL approach. *Innovation management and operational strategies*, e218707. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/imos.2025.508401.1447

[2] Riaz, M., & Farid, H. M. A. (2023). Enhancing green supply chain efficiency through linear diophantine fuzzy soft-max aggregation operators. *Journal of industrial intelligence*, *1*(1), 8–29. https://doi.org/10.56578/jii010102

[3] Esmaeilian, G., Fardoie, R. S., Hourali, M., & Farbod, E. (2024). Investigating the impact of blockchain technology adoption on integration and economic sustainability of the automotive supply chain: A bayesian structural equation modeling approach. *Transactions on quantitative finance and beyond*, *1*(1), 1–14. https://doi.org/10.22105/tqfb.v1i1.16

[4] Zoghi, A., Lotfi, F. H., Saen, R. F., & Saati, S. (2024). A cutting-edge data envelopment analysis model for measuring sustainable supplier performance like never before. *Journal of cleaner production*, *462*, 142714. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142714

[5] Islam, S., Amin, S. H., & Wardley, L. J. (2024). A supplier selection & order allocation planning framework by integrating deep learning, principal component analysis, and optimization techniques. *Expert systems with applications*, *235*, 121121. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121121

[6] Hesami, F. (2024). A hybrid ANP-TOPSIS method for strategic supplier selection in RL under rough uncertainty: A case study in the electronics industry. *Uncertainty discourse and applications*, *1*(1), 41–65. https://doi.org/10.48313/uda.v1i1.25

[7] Sahu, A. K., Sharma, M., Raut, R. D., Sahu, A. K., Sahu, N. K., Antony, J., & Tortorella, G. L. (2023). Decision-making framework for supplier selection using an integrated MCDM approach in a lean-agile-resilient-green environment: Evidence from Indian automotive sector. *TQM journal*, *35*(4), 964–1006. https://doi.org/10.1108/TQM-12-2021-0372

[8] Elbaz, J., & Iddik, S. (2020). Culture and green supply chain management (GSCM): A systematic literature review and a proposal of a model. *Management of environmental quality: An international journal*, *31*(2), 483–504. https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2019-0197

[9] Cao, Z., Huo, B., Li, Y., & Zhao, X. (2015). The impact of organizational culture on supply chain integration: A contingency and configuration approach. *Supply chain management: An international journal*, *20*(1), 24–41. https://doi.org/10.1108/SCM-11-2013-0426

[10] Kumar, S., Liu, J., & Demirag, O. C. (2016). National culture's impact on effectiveness of supply chain disruption management. *Journal of applied business and economics*, *17*(4), 11–29. https://scholar.valpo.edu/cba_fac_pub/34/

[11] Braunscheidel, M. J., Suresh, N. C., & Boisnier, A. D. (2010). Investigating the impact of organizational culture on supply chain integration. *Human resource management*, *49*(5), 883–911. https://doi.org/10.1002/hrm.20381

[12] Gao, X., & Cao, C. (2020). A novel multi-objective scenario-based optimization model for sustainable reverse logistics supply chain network redesign considering facility reconstruction. *Journal of cleaner production*, *270*, 122405. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122405

[13] Koc, K., Ekmekcioğlu, Ö., & Işık, Z. (2023). Developing a probabilistic decision-making model for reinforced sustainable supplier selection. *International journal of production economics*, *259*, 108820. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108820

[14] Garcia-Buendia, N., Moyano-Fuentes, J., Maqueira-Marín, J. M., Romano, P., & Molinaro, M. (2025). Strategic supplier performance in a competitive landscape: Enhancing organizational performance through lean supply chain management. *BRQ business research quarterly*, *28*(2), 474–490. https://doi.org/10.1177/23409444231210566%0A

[15] ForouzeshNejad, A. A. (2023). Leagile and sustainable supplier selection problem in the Industry 4.0 era: A case study of the medical devices using hybrid multi-criteria decision making tool. *Environmental science and pollution research*, *30*(5), 13418–13437. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22916-x

[16] Haffar, S., & Ozceylan, E. (2024). Blockchain-based system for supplier selection in sustainable and leagile supply chains. *IEEE access*, *12*, 139883–139911. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3467059

[17] Ulutaş, A., Krstić, M., Topal, A., Agnusdei, L., Tadić, S., & Miglietta, P. P. (2024). A novel hybrid Gray MCDM model for resilient supplier selection problem. *Mathematics*, *12*(10), 1444. https://doi.org/10.3390/math12101444

[18] Sun, J., Liu, Y., Xu, J., Zhu, F., & Wang, N. (2024). A probabilistic uncertain linguistic decision-making model for resilient supplier selection based on extended TOPSIS and BWM. *International journal of fuzzy systems*, *26*(3), 992–1015. https://doi.org/10.1007/s40815-023-01649-0

[19] Becerra, P., & Diaz, J. (2025). Supplier selection model considering sustainable and resilience aspects for mining industry. *Systems*, *13*(2), 81. https://doi.org/10.3390/systems13020081

[20] Anvarjonov, N. B. U., Um, K. H., Zhong, D. Y., & Shine, E. K. (2024). Achieving sustainability in manufacturing: The nexus of green supplier selection, green performance and outcome and process controls. *Journal of manufacturing technology management*, *35*(3), 480–501. https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2023-0398

[21] Ograh, T., Ayarkwa, J., Acheampong, A., & Abu, I. M. (2025). Advancing collaboration toward green supplier selection: Perspective of green relational capital. *Journal of public procurement*, *25*(1), 64–94. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2024-0046

[22] Wu, H. H., & Chang, S. Y. (2015). A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management. *Applied mathematics and computation*, *256*, 394–403. https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.01.041

[23] Mohamadi Zanjiran, D., Hashemkhani Zolfani, S., & Prentkovskis, O. (2019). LARG supplier selection based on integrating house of quality, Taguchi loss function and MOPA. *Economic research-ekonomska istraživanja*, *32*(1), 1944–1964. https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1635036

[24] Ghazvinian, A., Feng, B., Feng, J., Talebzadeh, H., & Dzikuć, M. (2024). Lean, agile, resilient, green, and sustainable (LARGS) supplier selection using multi-criteria structural equation modeling under fuzzy environments. *Sustainability 2024, vol. 16, page 1594*, *16*(4), 1594. https://doi.org/10.3390/su16041594

[25] Kabadayi, N., & Bakkal, S. (2024). Fermatean fuzzy analytic hierarchy process for supplier selection on larg supply chain paradigm. *International conference on intelligent and fuzzy systems* (pp. 373–382). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67192-0_43

[26] Sheykhizadeh, M., Ghasemi, R., Vandchali, H. R., Sepehri, A., & Torabi, S. A. (2024). A hybrid decision-making framework for a supplier selection problem based on lean, agile, resilience, and green criteria: A case study of a pharmaceutical industry. *Environment, development and sustainability*, *26*(12), 30997. https://doi.org/10.1007/s10668-023-04135-7

[27] Zeynali, F. R., Hatami, S., Khameneh, R. T., & Ghanavati-Nejad, M. (2024). Evaluating the performance of the raw material providers based on the customer-based LARG (CLARG) paradigm: A machine learning-based method. *Journal of optimization in industrial engineering*, *2*(17). https://shura.shu.ac.uk/34529/

[28] Nayeri, S., Khoei, M. A., Rouhani-Tazangi, M. R., GhanavatiNejad, M., Rahmani, M., & Tirkolaee, E. B. (2023). A data-driven model for sustainable and resilient supplier selection and order allocation problem in a responsive supply chain: A case study of healthcare system. *Engineering applications of artificial intelligence*, *124*, 106511. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106511

[29] Lin, S. W., & Lu, W. M. (2024). Using inverse DEA and machine learning algorithms to evaluate and predict suppliers' performance in the apple supply chain. *International journal of production economics*, *271*, 109203. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109203

[30] Saeidifar, S. M., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Javadian, N. (2025). Proposing a data-driven decision-making model for evaluating sustainable and resilient suppliers in the automotive industry. *Journal of quality engineering and management*, *15*(1), 83-109. (**In Persian**). https://doi.org/10.48313/jqem.2025.529590.1555

[31] Akbar, D., & Şimşek, M. (2025). *Optimizing supplier selection with large language models: An AI-driven approach for resilient supply chains.* https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4767072/v2

[32] Xie, Z., Tian, G., & Tao, Y. (2022). A multi-criteria decision-making framework for sustainable supplier selection in the circular economy and industry 4.0 era. *Sustainability 2022, vol. 14, page 16809*, *14*(24), 16809. https://doi.org/10.3390/SU142416809

[33] Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., & Al-e-Hashem, S. M. J. M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain network for an integrated water supply and wastewater collection system under uncertainty. *Journal of environmental management*, *275*, 111277. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111277

[34] Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science*, *14*(3), 681–695. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5

[35] Yazdani, M., Torkayesh, A. E., & Chatterjee, P. (2020). An integrated decision-making model for supplier evaluation in public healthcare system: The case study of a Spanish hospital. *Journal of enterprise information management*, *33*(5), 965–989. https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2019-0294

[36] Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International journal of physical distribution and logistics management*, *38*(5), 360–387. https://doi.org/10.1108/09600030810882816

[37] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International journal of production research*, *56*(17), 5945–5968. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1461950

[38] Zekhnini, K., Cherrafi, A., Bouhaddou, I., & Benabdellah, A. C. (2021). Suppliers selection ontology for viable digital supply chain performance. *IFIP advances in information and communication technology*, *633 IFIP*, 622–631. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_66

[39] Chaouni Benabdellah, A., Zekhnini, K., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & El Baz, J. (2023). Blockchain technology for viable circular digital supplychains: An integrated approach for evaluating the implementation barriers. *Benchmarking*, *30*(10), 4397–4424. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2022-0240

[40] Sawik, T. (2013). Selection and protection of suppliers in a supply chain with disruption risks. *International journal of logistics systems and management*, *15*(2–3), 143–159. https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.053763

[41] Garcia-Herreros, P., Wassick, J. M., & Grossmann, I. E. (2014). Design of resilient supply chains with risk of facility disruptions. *Industrial and engineering chemistry research*, *53*(44), 17240–17251. https://doi.org/10.1021/ie5004174

[42] Sawik, T. (2013). Selection of resilient supply portfolio under disruption risks. *Omega*, *41*(2), 259–269. https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.05.003

[43] Torabi, S. A., Soufi, H. R., & Sahebjamnia, N. (2014). A new framework for business impact analysis in business continuity management (with a case study). *Safety science*, *68*, 309–323. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.04.017

[44] Torabi, S. A., Baghersad, M., & Mansouri, S. A. (2015). Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *79*, 22–48. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.03.005

[45] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P., Relvas, S., & Novais, A. Q. (2015). Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. *Omega*, *56*, 53–73. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.03.008
[46] Zahiri, B., Zhuang, J., & Mohammadi, M. (2017). Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *103*, 109–142. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.009
[47] Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: A real-life case study. *Journal of cleaner production*, *278*, 123199. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123199
[48] Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering Open Innovation and Blockchain Technology. *Journal of cleaner production*, *436*, 140369. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140369
[49] Salleh, N. H. M., Abd Rasidi, N. A. S., & Jeevan, J. (2020). Lean, agile, resilience and green (LARG) paradigm in supply chain operations: a trial in a seaport system. *Australian journal of maritime and ocean affairs*, *12*(4), 200–216. https://doi.org/10.1080/18366503.2020.1833273
[50] Sonar, H., Gunasekaran, A., Agrawal, S., & Roy, M. (2022). Role of lean, agile, resilient, green, and sustainable paradigm in supplier selection. *Cleaner Logistics and supply chain*, *4*, 100059. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100059
[51] Li, Y., Diabat, A., & Lu, C. C. (2020). Leagile supplier selection in Chinese textile industries: A DEMATEL approach. *Annals of operations research*, *287*(1), 303–322. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03453-2
[52] Sonar, H., Gunasekaran, A., Agrawal, S., & Roy, M. (2022). Role of lean, agile, resilient, green, and sustainable paradigm in supplier selection. *Cleaner logistics and supply chain*, *4*, 100059. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100059
[53] Khanzadi, F., Radfar, R., & Pilevari, N. (2024). A review of lean, agile, resilient, and green (LARG) supply chain management in engineering, business and management areas. *Decision science letters*, *13*(2), 287–306. https://doi.org/10.5267/j.dsl.2024.3.002
[54] Osgooei, E. and Jafarzadeh Ghoushchi, S. (2025). An extended mathematical model for solving z-number linear programing problems using additive weighting method based on best-worst method. *Journal of fuzzy extension and applications*, e214287. https://doi.org/10.22105/jfea.2025.451599.1442
[55] Koç, S., Erden, C., Ateş, Ç., & Ceviz, E. (2024). Evaluation of potential logistics village alternatives using bayesian best-worst method. *Optimality*, *1*(1), 100–120. https://doi.org/10.22105/opt.v1i1.35
[56] Bayatzadeh, S., & Talaie, H. (2024). Identifying and evaluating of sustainable and resilient supplier selection criteria according to industry 5.0 concepts (Case study: Steel industry). *Tasmimgiri va tahqiq dar amaliyyat*, *9*(4), 1045-1063. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904
[57] Fallahpour, A., Nayeri, S., Sheikhalishahi, M., Wong, K. Y., Tian, G., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). A hyper-hybrid fuzzy decision-making framework for the sustainable-resilient supplier selection problem: A case study of Malaysian Palm oil industry. *Environmental science and pollution research*. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12491-y
[58] Yekta, A. P., Noveiri, M. J. S., Maghbouli, M., & Edalatpanah, S. A. (2024). Dynamic DEA with common weights: A case study of Iranian Airlines. *Journal of uncertain systems*, *17*(2), 2440001. https://doi.org/10.1142/S1752890924400014
[59] Lagzi, M. D., sajadi, S. M., & Taghizadeh-Yazdi, M. (2024). A hybrid stochastic data envelopment analysis and decision tree for performance prediction in retail industry. *Journal of retailing and consumer services*, *80*, 103908. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.103908
[60] Soltani, M. R., Edalatpanah, S. A., Sobhani, F. M., & Najafi, S. E. (2020). A novel two-stage DEA model in fuzzy environment: Application to industrial workshops performance measurement. *International journal of computational intelligence systems*, *13*(1), 1134–1152. https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200731.002
[61] Yazdani, M., & Kazemipor, H. (2024). Evaluating the efficiency and effectiveness of the organization by combining the BSC and DEA evaluation systems. *Financial and banking strategic studies*, *1*(4), 272-280. (**In Persian**). https://www.journal-fbs.com/article_196209.html?lang=en
[62] Ucal Sari, I., & Ak, U. (2022). Machine efficiency measurement in industry 4.0 using fuzzy data envelopment analysis. *Journal of fuzzy extension and applications*, *3*(2), 177–191. https://doi.org/10.22105/jfea.2022.326644.1199
[63] Taghizade Tame, L., Hosseinzadeh Lotfi, F., & Rostamy Malkhalifeh, M. (In Press). Fuzzy evaluation of fixed cost allocation in two-stage networks with undesirable outputs: Considering ideal and anti-ideal points. *Journal of fuzzy extension and applications*. https://doi.org/10.22105/jfea.2025.490267.1710
[64] Zuluaga, R., Camelo-Guarín, A., & Hoz, E. D. La. (2023). Assessing the relative impact of colombian higher education institutions using fuzzy data envelopment analysis (Fuzzy-Dea) in state evaluations. *Journal on efficiency and responsibility in education and science*, *16*(4), 299–312. https://doi.org/10.7160/eriesj.2023.160404
[65] Shikhzahedi, M. T. Y., Amirteimoori, A., Kordrostami, S., & Edalatpanah, S. A. (2024). Inverse data envelopment analysis model to improve efficiency by increasing outputs. *Decision making: applications in management and engineering*, *7*(2), 1–14. https://doi.org/10.31181/dmame722024788
[66] Omrani, H., Emrouznejad, A., Teplova, T., & Amini, M. (2024). Efficiency evaluation of electricity distribution companies: Integrating data envelopment analysis and machine learning for a holistic analysis. *Engineering applications of artificial intelligence*, *133*, 108636. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108636
[67] An, Q., Huang, S., Han, Y., & Zhu, Y. (2024). Ensemble learning method for classification: Integrating data envelopment analysis with machine learning. *Computers and operations research*, *169*, 106739. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106739
[68] Paul, U. K. (2024). Estimation of technical efficiency of chemical-free farming using data envelopment analysis and machine learning: evidence from India. *Benchmarking*, *31*(1), 140–161. https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2021-0494
[69] Kang, P. S., & Bhawna, B. (2025). Enhancing supply chain resilience through supervised machine learning: supplier performance analysis and risk profiling for a multi-class classification problem. *Business process management journal*. https://doi.org/10.1108/BPMJ-03-2024-0174
[70] Chen, C. B., & Klein, C. M. (1997). A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, *27*(1), 26–35. https://doi.org/10.1109/3477.552183